JULIO 2008

INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN



EVOLUCION
Base epigenética de la biodiversidad

FISICA
Manipulación de átomos mediante fotones

MEDICINA
Fisiología de la adicción al tabaco

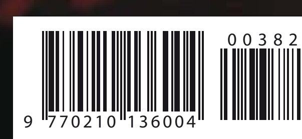
ENERGIA
¿Compensa reciclar el combustible nuclear?

www.investigacionyciencia.es

6,00 EUROS

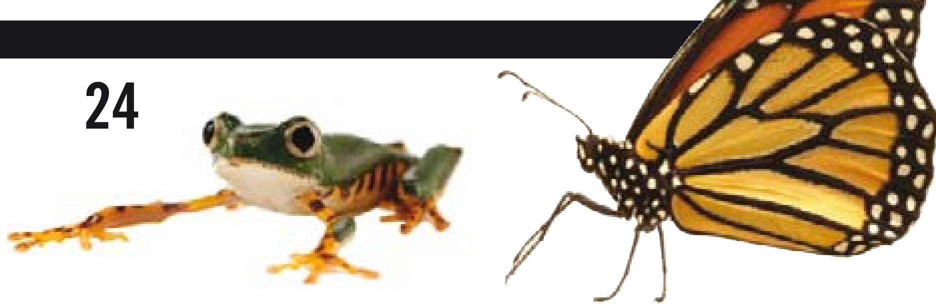
NACIMIENTO CAOTICO DE LOS PLANETAS

De colisiones aleatorias surgen nuevos sistemas solares

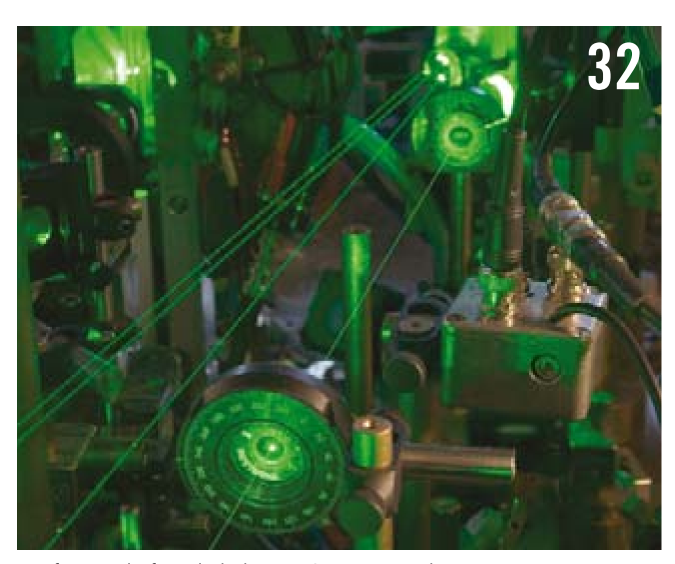


SUMARIO

Julio de 2008/ Número 382



Genes parecidos, seres muy diferentes. Pero en el ADN no sólo hay genes.



Los frentes de fase de la luz no siempre son planos.

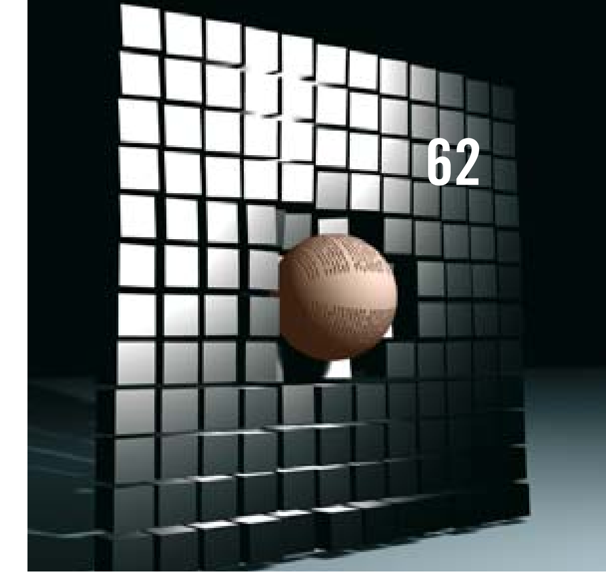


La "basura" citoplasmática que engullen los autofagosomas se transporta luego hasta orgánulos digestivos para su reciclaje.

ARTICULOS



La formación de los sistemas planetarios no es un proceso determinista.



Hacia las causas por la vía de las estadísticas poblacionales.



Pocos cigarrillos bastan para que un adolescente se enganche a la nicotina.

SECCIONES



DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
CHIEF NEWS EDITOR Philip M. Yam
SENIOR WRITER Gary Stix
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Peter Brown, Graham P. Collins, Mark Fischetti, Steve Mirsky, George Musser y Christine Soares
CONTRIBUTING EDITORS W. Wayt Gibbs, Marguerite Holloway, Michelle Press, Michael Shermer, Sarah Simpson
ART DIRECTOR Edward Bell
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

CHAIRMAN Brian Napack
PRESIDENT Steven Yee
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Dean Sanderson
VICE PRESIDENT Frances Newburg
VICE PRESIDENT, FINANCE, AND GENERAL MANAGER Michael Florek

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos
Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Teléfono 916 657 158

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD

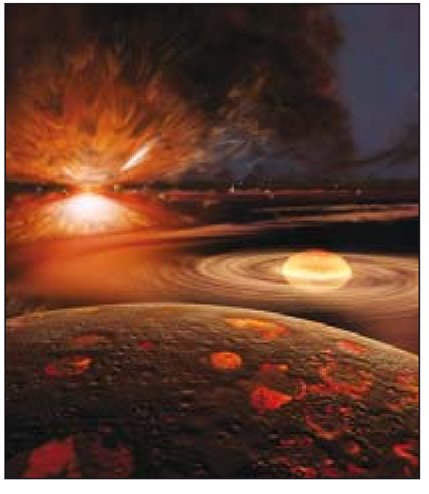
Madrid:
MMCATALAN PUBLICIDAD
M. Mercedes Catalán Rojas
Valle del silencio, 28 4.º J
28039 Madrid
Tel. 915 759 278 – Fax 918 276 474
Móvil 649 933 834

Cataluña:
Teresa Martí Marco
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. 934 143 344
Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

M.ª Rosa Zapatero Osorio: *La génesis de los planetas* y *Perfiles*; Juan Manuel González Mañas: *La regulación de la evolución*; Ramón Pascual: *Luz con momento angular orbital*; Luis Bou: *Ciencia 2.0*, *Puesta al día* y *Apuntes*; Juan Manuel González Mañas: *Autofagia*; J. Vilardell: *El reciclado nuclear*, *Microchips contra la falsificación*, *Hace... Curiosidades de la física* e *Ideas aplicadas*; Bruno Moreno: *Apuntes*; Anna Ferran: *Ciencia y sociedad*; Marián Beltrán: *Desarrollo sostenible*



Portada: Don Dixon

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	65,00 euro	120,00 euro
Resto del mundo	100,00 euro	190,00 euro

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España



¿Despedimos el hielo?

"Dinámica de los casquetes glaciales", de Robin E. Bell, en el número de abril, describe los efectos del hundimiento total de los casquetes de hielo de Groenlandia y la Antártica, pero actualmente no hay prueba alguna de que vayan a desaparecer del todo. Además, el modelo de Bell no tiene en cuenta el efecto de reacción que se produciría si sobre esas masas de tierra no gravitase hielo, que compensaría parte de la elevación del nivel del mar. Tampoco considera la posibilidad de que asciendan grandes cantidades de vapor de agua desde el océano hacia la atmósfera.

Raphael Ketani
Sunnyside, N.Y.

BELL RESPONDE: *Los casquetes de hielo han ido y han vuelto durante toda la historia de nuestro planeta. La reciente noticia del derrumbe de una gran parte de la plataforma glacial Wilkins da testimonio de esas oscilaciones. Las consecuencias de los cambios de los casquetes glaciales son globales y complejas. El terreno que subyace al casquete desaparecido reaccionará (en los países nórdicos y el norte de Canadá se eleva casi un centímetro al año al liberarse del peso de un casquete de hielo que existió hace más de 15.000 años), y el nivel del mar subirá en distinta medida según la temperatura del agua y su origen. Dejando estas complicaciones aparte, probablemente seguiremos viendo subir el nivel del mar a causa de la fusión de los casquetes polares. Es difícil trasladar el hielo a escala continental a un marco en el que podamos aplicar nuestra propia experiencia. La comunidad científica no vaticina la desaparición total de los casquetes de hielo polares, pero las variaciones glaciales van a merecer una creciente atención en los próximos decenios.*

¿Desechamos las cuerdas?

El recuadro "Cinco objetivos para el LHC", incluido en el artículo "Revolución en la física de partículas", de Chris Quigg [Informe Especial: El futuro de la física], en el número de abril, no hace mención alguna que relacione la teoría de cuerdas con los objetivos del próximo Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN. ¿Hay algún experimento en proyecto para el LHC que pudiera apoyar o desmentir las pretensiones, expectativas o predicciones de esa teoría?

Geoff Noakes
San Francisco

QUIGG RESPONDE: *La teoría de cuerdas no está en situación de hacer predicciones específicas para el LHC, pero las observaciones que aporte el LHC sí podrían dar alas a la teoría de cuerdas. El descubrimiento de la supersimetría alentaría esperanzas de que la incorporación de la gravedad contemplada en la teoría de cuerdas va por buen camino. Indicios de que hay más dimensiones apoyarían asimismo ciertos conceptos de la teoría de cuerdas. Por otro lado, la observación de algunos tipos de interacciones fuertes nuevas podría desanimar a quienes piensan que las cuerdas pronto tendrán relevancia en nuestros experimentos. Como los teóricos de las cuerdas todavía no son capaces de comparar un número medido con alguno predicho, gran parte del efecto tendrá la forma de diálogo entre un experimento real y los retazos de cosmovisión de la teoría de cuerdas. Aun antes de haber empezado a funcionar, el LHC ha llevado a destacados teóricos de las cuerdas a dejar aparte, de momento, su teoría y a concentrarse en problemas teóricos que prometen un diálogo más inmediato con los experimentos del LHC.*

Sol y sombra

En "El color de las plantas extraterrestres", del número de junio, Nancy Y. Kiang explica que las plantas de un planeta que girase alrededor de una estrella madura, de tipo M, quizá serían negras, al haberse adaptado sus pigmentos fotosintéticos al espectro de la luz de un sol así. Pero la zona habitable de un sistema solar de ese tipo habría de estar tan cerca de la estrella, que muy posiblemente se producirían acoplamientos de marea, es decir, uno de los hemisferios miraría siempre a la estrella. Con probabilidad, las plantas de la superficie desarrollarían pigmentos fotosensibles sólo en la cara iluminada. La cara oscura sería por lo normal gris o parda, más clara que la otra. Que se descubriesen pigmentos vegetales de otro planeta dependería, pues, del ángulo entre la línea de visión de los telescopios espaciales y la línea que uniese ese mundo con su estrella.

James W. Scott
Wickoff, Nueva Jersey.

RESPUESTA DE KIANG: *Scott expone ideas excelentes. Hasta en la Tierra varía la pigmentación con la latitud, pero no tanto porque dependa de los cambios espectrales de la radiación como por que la forma de las plantas depende de la altitud del Sol en el cielo. La forma cónica de las coníferas a altas latitudes, por ejemplo, viene mejor para interceptar la luz cuando los ángulos de elevación del Sol son pequeños. En un planeta con acoplamiento de marea que girase alrededor de una estrella de tipo M no sólo veríamos adaptaciones a los ángulos de altitud casi fijos de la estrella, sino, seguramente, un gradiente con respecto a la longitud geográfica. Los primeros telescopios espaciales que obtengan espectros planetarios quizá no puedan distinguir esos gradientes, pero de las variaciones que se observasen entre las caras de los planetas se podría sacar más información sobre su superficie.*

Errata corrige

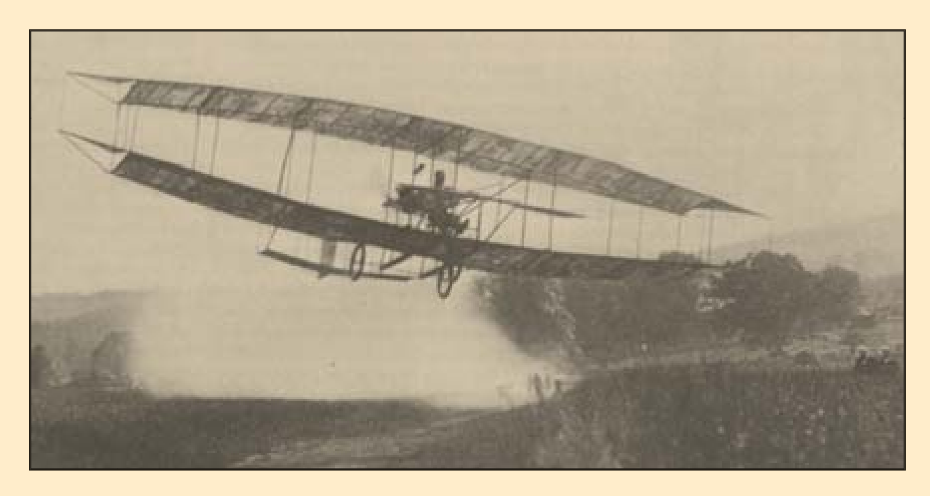
En la revista de junio 2008, núm. 381, en la sección sobre "Detección de armas" [Ideas aplicadas], aparecen datos incorrectos sobre el aparato de barrido ("escaneo") por retrodifusión. El tiempo de barrido es de 8 segundos, la frecuencia del haz 1212 GHz y la energía del haz 50 keV.

El artículo "El color de las plantas extraterrestres" afirma erróneamente que las algas pardas contienen ficobilinas; deben su color a ciertos carotenoides. En el recuadro "Filtración de la luz estelar", en las unidades del eje de ordenadas debería leerse "fotones por metro cuadrado por segundo y por micra".

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

...cincuenta años

Secretos. «Un informe de la Cámara de Representantes concluía en que ‘el Gobierno Federal ha sumergido a los científicos americanos en una ciénaga de secretismo’ y que la clasificación de la información científica fue un factor importante para ‘que el país perdiera la primera vuelta de la carrera al espacio’. Un problema crucial fue la persistente tendencia a la sobreclasificación de documentos. Hay testigos que esto lo achacan en parte ‘a la neurosis de nuestro tiempo’ y en parte al hecho de que ‘no hay sanción por estampillar de secreto lo que no debería mantenerse secreto’. Señala el informe que en la actualidad más de un millón de personas tienen autoridad para clasificar información.»



1. Vuelo ganador del aeroplano Curtiss para el trofeo Scientific American, el 4 de julio de 1908

Hormigón pretensado. «La compresión aumenta la resistencia del hormigón; la tracción aumenta la del acero. Esas propiedades opuestas se combinan en un material de construcción más resistente que el hormigón armado y más barato que el acero solo. Nos referimos al hormigón pretensado. Desarrollado durante los últimos años, ya se ha reconocido como uno de los grandes adelantos de la construcción del siglo xx. Con él se han construido millares de edificios y puentes; la industria del hormigón pretensado alcanza en EE.UU. cerca de los mil millones de dólares. No parece excesivo afirmar que la construcción está pasando de la era del acero a la era del hormigón pretensado.»

...cien años

El vuelo de Curtiss. «Casi una veintena de miembros del Club Aéreo de América y otras personas interesadas en la aviación viajaron el Cuatro de Julio a Hammondsport (Nueva York) para presenciar el vuelo del tercer aeroplano de la Asociación de Experimentos Aéreos, el ‘June Bug’, para hacerse con el trofeo Scientific American. La distancia a cubrir era de un kilómetro en línea recta, la exigida para la primera prueba. Como el señor Curtiss era el primer aviador en presentarse con un aeroplano en funcionamiento y solicitar una prueba, según las reglas, si realizaba el vuelo propuesto, él sería el primer ganador. El segundo intento se realizó a las siete de la tarde. Esta vez la máquina se elevó rápidamente; ganó velocidad hasta una altura de unos seis metros. Al acercarse al poste final, descendió hasta unos cuatro metros y medio; luego siguió adelante, con un amplio viraje a la izquierda, y se posó indemne en un terreno irregular. La distancia recorrida superó el kilómetro y medio.»



2. Trofeo de aeronáutica Scientific American, 1908

...ciento cincuenta años

Reivindicación del telégrafo. «Es bien sabido que los ingleses reclaman la invención del telégrafo magnético para su compatriota, el profesor Wheatstone. La iniciativa del telégrafo transatlántico ha hecho de la paternidad del invento un asunto del que se habla mucho en Europa. El parisiense *Moniteur* dice: ‘Sin duda no corresponde al señor Morse el descubrimiento de los principios en los que se fundamenta el telégrafo eléctrico, pero él fue quien trasladó el descubrimiento desde el terreno de la ciencia especulativa al de las aplicaciones prácticas.’»

Trampa-sapo. «Un corresponsal en Illinois nos da cuenta de una nueva trampa para insectos que sin duda tendrá mucho éxito. Dice ‘Hágase con un sapo de buen tamaño, como los que San Patricio expulsó de Irlanda (buena suerte para él), que se domestican fácilmente; practique luego un orificio en el fondo de una pequeña caja, de tal modo que el sapo pueda asomar la cabeza. Viértale un poco de melaza en el lomo e introdúzcalo en la caja. Su lengua mide casi ocho centímetros; atrapa todo insecto que se ponga a su alcance.’ El inventor lo cree adecuado sobre todo para atrapar pulgas, pero si nos encontráramos con una pulga en la cama, desde luego preferiríamos su compañía a la de una caja con un sapo.»

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. XCIX, N.º 3; 18 DE JULIO DE 1908 *(arriba)*; *SCIENTIFIC AMERICAN*, VOL. XCIX, N.º 2; 11 DE JULIO DE 1908 *(abajo)*

¿Qué ha sido de ...?

Recopilación de Philip Yam

Misterio en la telemetría

Las naves *Pioneer 10* y *11*, en su rauda fuga del sistema solar, están perdiendo velocidad de forma misteriosa, como si una fuerza atractiva adicional desde el Sol quisiera retenerlas. Las explicaciones ofrecidas van desde posibles escapes de gases y errores de observación hasta modificaciones en las teorías gravitatorias.

John Anderson y su grupo, del laboratorio de propulsión a chorro (JPL), que contribuyeron a descubrir la "anomalía Pioneer", han apreciado variaciones de velocidad similares e inesperadas en cuatro naves que han sobrevolado la Tierra en su periplo: la sonda Galileo, la misión NEAR (de aproximación a asteroides cercanos), y las naves *Cassini* y *Rosetta*. Sus velocidades experimentaron incrementos o decrementos de hasta una parte por millón consiguientes al vuelo sobre nuestro planeta.

La excepción fue la nave *Messenger*, que se aproximó a la Tierra desde una latitud de 31 grados norte y la abandonó desde una latitud de 32 grados sur, a distancias casi iguales del ecuador. En los vuelos en los que se han observado anomalías, en cambio, los ángulos de aproximación y de salida fueron netamente desiguales. En la misión NEAR, el ángulo de ingreso fue de unos 20 grados sur y el de egreso de unos 72 grados sur. (Las mediciones indicaban que se alejaba a razón de unos 13 milímetros por segundo más de lo esperado.) A mayor asimetría, más acusado el efecto sobre la velocidad.

Esas anomalías podrían deberse a variaciones en los campos magnético o gravitatorio de la Tierra, pero los satélites que orbitan en torno a la Tierra no parecen sufrir perturbaciones. Por otra parte, aunque hubiera fugas de gases que pudieran frenar la nave, no explicarían la aparente aceleración de algunas sondas. Hay una característica que parece vincular las anomalías en los sobrevuelos y en las naves *Pioneer*: en todos los casos, las naves siguen trayectorias hiperbólicas, es decir, tienen velocidad suficiente para escapar del centro de atracción (el Sol para las naves *Pioneer*, la Tierra para las demás). Tal vez haya en las trayectorias hiperbólicas algo que todavía no se ha tenido en cuenta.

—*Charles Q. Choi*



La sonda *Galileo*, que llegó a Júpiter en 1995, experimentó un cambio de velocidad inexplicable cuando sobrevoló la Tierra.

NASA/JPL (*Galileo y Júpiter*); CHUCK PEFLEY *Aurora Photos (cabeza)*; BRIAN J. SKERRY *National Geographic Image Collection (atún rojo)*

Agujeros negros en fibra óptica

En su investigación sobre los agujeros negros, los físicos buscan analogías que sean viables en el laboratorio [*véase* "Agujeros negros acústicos", por Renaud Parentani; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 2002]. Tal vez las fibras ópticas lo permitan. La clave para crear horizontes de sucesos artificiales consiste en lograr que un medio de tipo fluido avance más rápidamente de lo que se propagan las ondas a su través. Los investigadores enviaron por una fibra óptica un impulso de luz roja, que modificó el índice de refracción de la fibra; lanzaron después un haz de luz infrarroja, calibrado para que alcanzara el impulso. El haz infrarrojo acusó un desplazamiento hacia el azul, lo que indicaba que sus frentes de onda se habían acumulado en la cola del impulso. Técnicamente, el corrimiento al azul constituye una característica del horizonte de sucesos de un agujero *blanco* (un agujero negro vuelto del revés). Aun así, el frente de ataque del impulso constituiría un remedo del horizonte de sucesos de un agujero negro, según exponía el equipo investigador en *Science* del 7 de marzo.

—*J. R. Minkel*

Quien tuvo... ¿retiene?

Los cabellos crecen, caen y pueden tardar mucho tiempo en volver a salir, demasiado para muchas personas a partir de cierta edad [*véase* "Crecimiento y caída del pelo", por Ricki L. Rusting; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 2001]. El equipo de Elaine Fuchs, de la Universidad Rockefeller, ha demostrado que el bloqueo de la proteína NFATc1 acorta el período de reposo de las células madre de los folículos pilosos. En el estudio de Fuchs, el pelo creció normalmente. Ello



sugiere que la fase de reposo, considerada antaño una forma de protección contra mutaciones o la pérdida de células, no es tan necesaria como se pensaba. El trabajo, publicado en *Cell* de 25 de enero, contribuye a explicar la actividad de las células madre; podría desembocar en nuevos tratamientos contra la alopecia.

Exito en la freza

En acuicultura se lleva tiempo intentando, sin conseguirlo, que el atún rojo se reproduzca en cautividad. Con ello se pretende salvar esta especie marina en peligro de extinción por sobrepesca [*véase* "El atún rojo en peligro", por Richard Ellis; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 2008]. Al cabo de tres años de esfuerzos, la compañía australiana Clean Seas Tuna Limited hizo saber en marzo que había inducido la freza en atunes rojos del hemisferio sur. Las larvas de este atún crecen a razón de un



milímetro diario: habrán de pasar años antes de que los juveniles alcancen un tamaño comercial. Es de temer, pues, que los atunes de piscifactoría no lleguen a tiempo para salvar a algunas poblaciones de atún rojo.

QUIMICA

¿Por qué en las combustiones la masa del dióxido de carbono es mayor que la del combustible?

El carbono de los compuestos que integran los combustibles se encuentra, en general, reducido: los átomos de carbono están químicamente enlazados a otros átomos de carbono o a átomos de hidrógeno. En la combustión, se rompen esos enlaces y se forman otros nuevos con átomos de oxígeno (tomado del aire, casi siempre), generándose así CO_2. Dado que la masa atómica del oxígeno es mayor que la del carbono y mucho mayor que la del hidrógeno, los productos de la combustión tienen una masa mayor que la del combustible.

Tomemos, por ejemplo, la gasolina. El octano, uno de sus componentes principales, es una molécula integrada por ocho átomos de carbono y 18 átomos de hidrógenos. La masa de un mol ($6{,}02 \times 10^{23}$ unidades) de octano es igual a la suma de las masas de los ocho moles de átomos de carbono y de los 18 moles de hidrógeno que lo componen. La masa de un mol de carbono es de 12 gramos; la masa de un mol de hidrógeno es 1 gramo. Por consiguiente, la masa de un mol de octano es $8 \times 12 + 18 \times 1 = 114$ gramos.

La masa de un mol de CO_2 es de 44 gramos (1×12 gramos por mol de carbono + 2×16 gramos por mol de oxígeno). En la combustión completa del octano cada uno de sus ocho átomos de carbono se integra en una molécula de CO_2, generando ocho moléculas de dióxido de carbono por cada molécula de octano que se quema, o sea, ocho moles de CO_2 por cada mol de octano. La combustión de un mol de octano producirá, por lo tanto, 352 (8×44) gramos de dióxido de carbono.

Así pues, la razón entre la masa de CO_2 producido y la masa del octano en una combustión completa es de 352 a 114, o sea, algo más de 3 a 1. En las combustiones reales las razones serán diferentes, porque la gasolina no es octano puro, ni la combustión es siempre completa.

—Susan Trumbore
Universidad de California en Irvine



ADAPTACION

Partir para defenderse

Que la mejor defensa para un animal marino ante un enemigo consista en partir no siempre significa que huya, sino que se parta en dos. Es el caso de *Dendraster excentricus*, un equinodermo emparentado con las estrellas de mar que debe su nombre vulgar en inglés, "dólar de arena", a su forma de disco. Cuando sus larvas detectan mucosidades procedentes de depredadores cercanos se clonan: se reproducen asexualmente en 24 horas. Aunque la clonación es lenta en comparación con el ataque de un depredador, si las larvas se dividen a tiempo aumentará la probabilidad de que no sean detectadas. El tamaño de los clones es sólo dos tercios del tamaño típico del original. Muchos animales se clonan, pero se vinculaba el proceso al crecimiento y a la reproducción, nunca a la necesidad de defenderse contra depredadores carnívoros. La clonación sería una respuesta a los depredadores cuando un tamaño más pequeño confiere una ventaja en lo que se refiere a la seguridad.

—Charles Q. Choi



Dos mejor que uno: Una larva de *Dendraster excentricus* comienza a clonarse.

CAMBIO CLIMATICO

Bajarles los humos a las chimeneas

Se lleva mucho tiempo buscando una sustancia que pueda absorber el dióxido de carbono (CO_2) de las chimeneas antes de que este gas de efecto invernadero se disipe en la atmósfera. Las esponjas de CO_2 existentes presentan varios inconvenientes: demasiado caras, su uso consume demasiada energía, no absorben suficiente dióxido de carbono o son inestables a largo plazo. Sin embargo, el absorbente sólido que acaban de desarrollar Christopher Jones y sus colaboradores, del Instituto de Tecnología de Georgia, es a la vez potente y duradero.

El material contiene unos compuestos ricos en nitrógeno, las aminas, sobre un sustrato poroso de sílice. Las aminas son bases que neutralizan el gas ácido de dióxido de carbono. Al calentarse, la sustancia libera el CO_2 atrapado, para su almacenamiento. Este material de bajo coste tiene una estructura hiperramificada, lo cual ayuda a que contenga un gran número de aminas, explica Jones, y los fuertes enlaces químicos que lo forman permiten que se reutilice frecuentemente.

—Charles Q. Choi

TIM RIDLEY *Getty Images* (*coche*); CORTESIA DE DAWN VAUGHN; FUENTE: "PREDATORS INDUCE CLONING IN ECHINODERM LARVAE", POR DAWN VAUGHN Y RICHARD R. STRATHMANN EN ***SCIENCE***, VOL. 319; 14 DE MARZO DE 2008. REIMPRESO CON PERMISO DE AAAS

GENETICA

Mutantes procedentes del aire

Ratones que fueron mantenidos a sotavento de dos acerías y de una carretera principal desarrollaron en su esperma un 60 por ciento más de mutaciones que sus hermanos que respiraban aire muy filtrado. Las células espermáticas germinales sufrieron lesiones tras sólo tres semanas de exposición, posiblemente a causa de un estrés oxidativo desencadenado por las partículas en suspensión. Dado que el esperma conservaba su funcionalidad, las mutaciones podrían haberse transferido a la descendencia.

—*Philip Yam*

IN MEMORIAM

Sir Arthur C. Clarke, 1917-2008

Vestía un pijama y un albornoz y apoyaba un hinchado pie descalzo sobre un escabel. Ese era el aspecto del prestigioso escritor de ciencia ficción Arthur C. Clarke la única vez que, junto con otros redactores de *Scientific American*, me encontré con él. Era octubre de 1999 y había llegado a Nueva York, en un viaje muy poco habitual y por razones médicas, desde su país de adopción, Sri Lanka.

Clarke nos había invitado a su habitación del histórico Hotel Chelsea, donde, a mediados de la década de los sesenta, había trabajado en su obra más conocida: *2001: Una odisea del espacio*. Allí nos reprochó que no nos tomásemos suficientemente en serio la fusión fría. Creía que aún podría producirse un descubrimiento revolucionario gracias a los experimentos de los escasos defensores de la idea que quedaban en ese momento. El optimismo de Clarke sobre las posibilidades de la técnica futura se manifiesta en sus tres famosas "leyes", una de las cuales afirma que una tecnología suficientemente avanzada es indistinguible de la magia.

En 1945 escribió en la revista *Wireless World* que un satélite que girase en una órbita ecuatorial con un radio de 42.000 kilómetros permanecería estable sobre el mismo punto de la Tierra y que tres de ellos podrían transmitir señales de radio a cualquier lugar del mundo. La idea no era de Clark, pero fue él quien la popularizó. En 1964 se lanzaría el primer satélite geoestacionario de comunicaciones.

Clarke, que sufría del síndrome pospolio, escribió decenas de libros, de ficción o no, y ganó numerosos premios. Un asteroide, una órbita, una especie de dinosaurio y varios premios llevan su nombre. Muchos científicos, astronautas y escritores le atribuyen la inspiración de comenzar sus respectivas carreras.

—*Graham P. Collins*

FISICA

Nubes de entrelazamiento

Un grupo del Instituto de Tecnología de California ha combinado el entrelazamiento cuántico (correlaciones instantáneas entre partículas distantes) con la técnica de detener abruptamente la luz. Con un divisor de haz convirtieron un fotón en un par entrelazado y almacenaron esos dos estados a una distancia de un milímetro, dentro de una nube de átomos de cesio enfriados a una temperatura cercana al cero absoluto. Cuando volvieron a combinar el par para formar luz, el 20 por ciento del entrelazamiento original se había conservado, un porcentaje mayor que en experimentos anteriores.

Esta demostración abre el camino para enlazar dos nubes atómicas distintas y utilizar el teletransporte cuántico de una partícula desde una nube a la otra, en una especie de red de telecomunicaciones cuántica.

—*J. R. Minkel*

DATOS



Arca para el fin del mundo

Construida en el permafrost de la isla noruega de Spitsbergen, en el Círculo Polar Artico, la Cámara Mundial de Semillas Svalbard se inauguró oficialmente el 26 de febrero. Esta instalación de alta seguridad, costeada por el gobierno noruego, se construyó con el objetivo de albergar una biblioteca de semillas de todos los cultivos destinados a la alimentación, procedentes de todos los países, como salvaguardia contra guerras, pobreza y desastres medioambientales, incluido el cambio climático. La cámara está situada a una altitud de 130 metros; por tanto, aun cuando se derritiesen los casquetes polares, la cámara no se inundaría. Las muestras, almacenadas en papel de aluminio de cuatro capas, contienen centenares de semillas.

Número actual de muestras de semillas almacenadas: 268.000

Peso en toneladas: 10

Número máximo de muestras: 4,5 millones

Número de semillas: 2250 millones

Temperatura de almacenamiento (grados centígrados): –18

Número de años que se mantendrán congeladas las semillas si se interrumpe el suministro eléctrico: 200

Número de puertas blindadas y herméticas que protegen las semillas: 4

Tiempo estimado de supervivencia de las semillas, en años:

Cebada: 2000

Trigo: 1700

Sorgo: 20.000

FUENTES: Ministerio de Agricultura y Alimentación, Noruega

ANDREW HOLBROOKE *Corbis (izquierda)*; MARI TEFRE *Svalbard Global Vault (derecha)*

Transistores moleculares

En el límite de la miniaturización electrónica, aprovechan su condición cuántica

El desarrollo técnico de las últimas décadas ha venido marcado por los avances en el perfeccionamiento de componentes electrónicos, sobre todo los ligados al diseño y fabricación de microprocesadores, dispositivos básicos de cualquier ordenador. Aquí es donde encontramos al transistor, sin lugar a dudas el componente principal de la electrónica moderna.

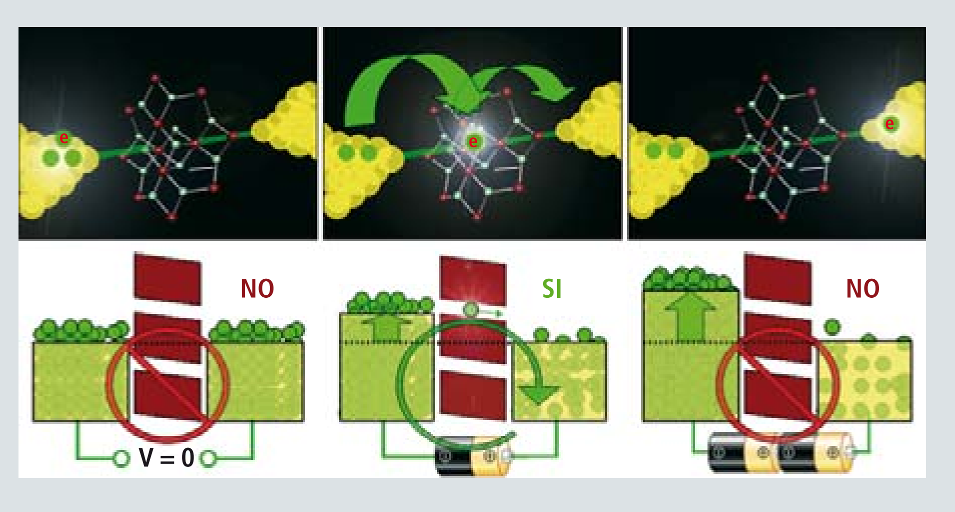
Así ha sido desde que en 1947 los físicos William Shockley, John Bardeen y Walter Brattain inventasen un transistor rudimentario, de varios centímetros de largo, que venía a sustituir a las válvulas de filamento, que todo el mundo conocía por llevarlas los aparatos de radios y que luego todavía utilizarían los televisores. Muchos lectores las recordarán: eran una especie de bombillas alargadas, de interior algo más complejo que el de las que usamos para alumbrarnos.

Las válvulas cumplían una doble misión: controlaban el paso de la corriente eléctrica y la amplificaban. Por eso resultaban indispensables en la transmisión de señales eléctricas a largas distancias. Sin embargo, las válvulas acarreaban muchos problemas. Consumían gran cantidad de energía, requerían vacío para que el filamento no se oxidase y se rompían fácilmente. El transistor permitió controlar el paso de corriente de una manera mucho más sencilla y además solucionó todos los problemas mencionados.

Pero la explosión de técnicas a que dio lugar la aparición del transistor vendría ligada a la capacidad de físicos e ingenieros de miniaturizarlo y a la aparición del circuito integrado, donde los cables de cobre fueron reemplazados por líneas de corriente grabadas en la superficie de un sustrato semiconductor (silicio). Al principio, los transistores medían alrededor de un centímetro. En 1971, el microprocesador 4004 de Intel albergaba ya alrededor de 2000 transistores. Hoy en día, un Pentium de última generación tiene unos diez millones de transistores, de un tamaño promedio de apenas 100 nanómetros (cien milmillonésimas de metro). IBM acaba de anunciar un transistor comercial de apenas 30 nanómetros.

Curiosamente, el ritmo de miniaturización de transistores obedece a ley de Moore, según la cual el tamaño del transistor se reduce a la mitad cada año y medio, patrón que se ha cumplido desde 1970. Y es esto lo que más preocupa a las empresas electrónicas en la actualidad, porque en el camino de miniaturi-

UNA CORRIENTE A TRAVES DE UNA MOLECULA

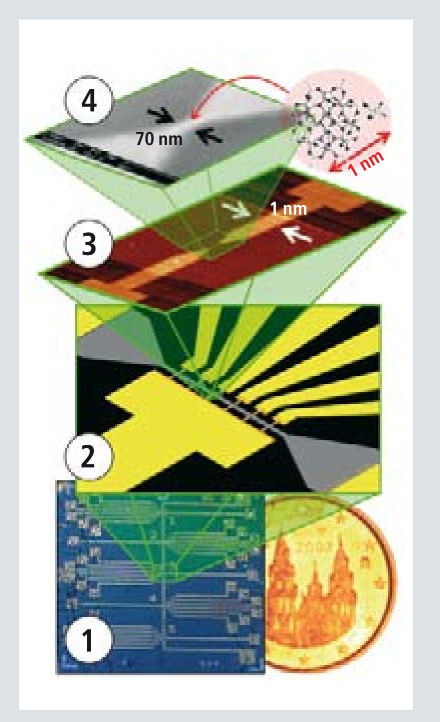


La ilustración muestra la secuencia de una conducción de corriente eléctrica (de electrones) a través de una molécula nanométrica situada entre dos electrodos (un transistor molecular). Abajo se representa la energía correspondiente a los electrodos (*cajas amarillas*), llenas de electrones (*bolas verdes*), dependiendo del potencial aplicado (representado por las pilas conectadas al circuito). La energía de la molécula se representa con la estructura marrón vertical, cuyos canales equivalen a los únicos niveles de energía que la molécula puede tomar. De acuerdo con la teoría de la mecánica cuántica. Los electrones sólo pueden acceder a la molécula si su energía coincide con uno de los niveles electrostáticos de la molécula. Para entenderlo, echemos un vistazo a la secuencia mostrada. A la izquierda, no hay ningún voltaje aplicado entre los dos electrodos, con lo que ambos tienen la misma energía (*altura de las cajas amarillas*) y el mismo número de electrones (*número de bolas verdes*). Además, los electrones no pueden pasar de un electrodo a otro porque no hay ningún nivel molecular accesible en esa situación; ni se establece corriente eléctrica.

Cuando se aplica un potencial concreto (digamos que conectamos una pila al circuito), como en las imágenes centrales, el electrodo izquierdo se llena de electrones y su energía aumenta, haciendo que los electrones puedan acceder a un nivel de la molécula, con lo que transitarán al electrodo opuesto, generándose así una corriente eléctrica. Sin embargo, cuando se aumenta aún más el potencial (*imágenes a la derecha*), aunque la energía del electrodo izquierdo sigue aumentando y se llena aun más de electrones, no hay posibilidad de aumentar la conducción porque no hay nuevos niveles moleculares accesibles. Esto es un claro ejemplo del funcionamiento de un transistor y cómo se puede controlar el paso de corriente. En la práctica, se utiliza un tercer electrodo, situado bajo la molécula, que permite sintonizar sus niveles energéticos: se ha creado un *transistor de campo*.

UN CHIP DE TRANSISTORES MOLECULARES

Esta ilustración muestra diferentes ampliaciones de la circuitería de un chip de treinta transistores moleculares. En la imagen (1) se muestra el chip en comparación con un céntimo de euro. La imagen (2) muestra el diseño usado en su fabricación. Las líneas amarillas son de oro, de un espesor de 200 nanómetros; las naranjas tienen un espesor de 20 nanómetros y corresponden a los electrodos de los seis transistores (uno de los electrodos es compartido). La línea gris que pasa por debajo es el tercer electrodo, que se utiliza para sintonizar los niveles de energía de la molécula. En las imágenes (3) y (4) se muestran fotografías del nanohilo que formará, al fundirse en su parte más estrecha, un transistor, tomadas por microscopios de fuerzas atómicas y de transmisión de electrones, respectivamente. Posteriormente, se depositará en el transistor una de nuestras moléculas magnéticas, una molécula de manganeso (Mn_{12}) de un nanómetro de diámetro.



zación hacia lo insospechadamente pequeño la ley de Moore se va a topar de cara con otra ley de la naturaleza, mucho más fundamental, que emerge en el mundo nanoscópico y gobierna el comportamiento de todas las cosas, corriente eléctrica y transistores incluidos: la mecánica cuántica.

Me imagino al lector pensando: "¡Ya estamos con la cuántica de marras! ¿Por qué es tan importante y parece estar tan ligada a la nanotecnia?" La respuesta es simple. Cuando el tamaño de un sistema decrece considerablemente, todas sus características cambian de manera drástica. Por eso es importante la cuántica y afecta tan directamente a la nanotecnia: porque explica este comportamiento. Y ¿por qué la mecánica cuántica supone un problema para los transistores del futuro? La respuesta es simple también. Si sigue decreciendo su tamaño, llegará un momento en el que su comportamiento cambiará de tal manera, que dejarán de actuar como transistores, con lo que serán inservibles.

Pongamos un ejemplo sencillo. Tomemos una bombilla cuya luminosidad sea regulable. Su energía (cantidad de luz) puede adquirir cualquier valor determinado por la corriente que hagamos pasar por su filamento. Sin embargo, si fuéramos capaces de reducir esa bombilla hasta un tamaño nanométrico, su energía luminosa sólo podría adquirir ciertos valores, aunque variásemos continuamente la corriente que fluye por su filamento. Añádase que, al disminuir el tamaño de los circuitos integrados, las pequeñas corrientes utilizadas para procesar (transferir) información entre los transistores pueden llegar a "fundir" los cables. Se trata del mismo fenómeno que utilizan los fusibles para prevenir grandes descargas eléctricas en los electrodomésticos de nuestras casas. El problema se agrava tanto más cuanto menor sea el diámetro de las líneas de corriente del circuito; empieza a cobrar importancia por debajo de los cien nanómetros, justo el rango de interés en los planes a medio plazo de los fabricantes de microprocesadores.

Con todo lo dicho, parecería imposible seguir disminuyendo el tamaño de los procesadores mucho más allá del nivel actual. Sin embargo, la ciencia ha logrado aprovechar las dos limitaciones expuestas para construir un transistor *de un solo nanómetro,* que opera íntegramente bajo las leyes de la mecánica cuántica: el transistor monoelectrónico molecular. Usa los estados cuánticos de energía de una molécula para regular el paso de corriente (*véase el recuadro "Una corriente a través de una molécula"*).

No se trata de una tarea fácil. Estamos hablando de incorporar un objeto de un nanómetro en un circuito; es decir, debemos hacer conexiones a ambos lados de la molécula, con lo que necesitamos dos electrodos (nanohilos) que han de estar separados por un nanómetro. Semejante nivel de detalle en la fabricación de circuitos queda lejos de la realidad alcanzable con la técnica actual, que tiene su límite en la escala de las varias decenas de nanómetros.

No deja de ser curiosa la forma en que se resolvió el problema de la fabricación de nanoelectrodos para los transistores moleculares. Unos investigadores de la Universidad de Berkeley se dieron cuenta de que cuando se funde de manera controlada un nanohilo, haciendo pasar una determinada corriente eléctrica (recuerden los fusibles), se produce una ruptura que puede ser de tan sólo un nanómetro. Fue un químico de Harvard el primero en utilizar la nueva técnica para producir un transistor molecular. Sumergió un chip que contenía varias decenas de nanohilos, previamente fundidos, en una solución líquida de moléculas de fullereno Co_{60} (una molécula de un nanómetro de diámetro popularizada por su semejanza a un balón de fútbol) y esperó a que el azar hiciese que al menos una de ellas fuese a parar entre las dos secciones de uno de los nanohilos rotos. Así nació el primer transistor molecular de sólo un nanómetro de tamaño, logro que constituyó un gran avance en el desarrollo de la nanoelectrónica.

Sólo unos pocos grupos de investigación (entre ellos, los de la Universidad Cornell o del Instituto Técnico de Delft) han conseguido fabricar transistores moleculares durante los últimos años, utilizando moléculas de interés diverso según el campo de aplicación del dispositivo. Nosotros, en la Universidad Central de Florida, hemos creado transistores monoelectrónicos que, para su funcionamiento, se valen de moléculas magnéticas (*véase el recuadro "Un chip de transistores moleculares"*).

El carácter magnético de nuestras moléculas confiere al transistor molecular unas propiedades únicas. Se puede imaginar la molécula magnética como una pequeña brújula, de sólo un nanómetro de longitud pero con polos norte y sur. Sabemos lo que le pasa a una brújula en presencia de un campo magnético: que se orienta en su misma dirección (gra-

cias a lo cual nos orienta en campo abierto). Con la molécula ocurre lo mismo: sus polos se alinean con un campo magnético que se utiliza para controlar su orientación. Los electrones que constituyen la corriente eléctrica que pasa por nuestra molécula-transistor también son en sí mismos pequeñas brújulas, con norte y sur.

Debido a la naturaleza magnética de la molécula y del electrón, se produce una interacción entre ambos que sirve para controlar la corriente a través del transistor, ya que el electrón sólo puede atravesar la molécula si ambos tienen la misma orientación de sus polos. Expliquémoslo con una imagen. Supongamos que queremos acercar mutuamente dos imanes potentes. Si al acercarlos los enfrentamos por el mismo polo, la interacción entre ambos impedirá esa aproximación, pero si giramos uno y enfrentamos su polo sur al norte del otro tenderán a pegarse súbitamente.

Lo dijimos antes sobre los objetos pequeños, su comportamiento está regido por la mecánica cuántica. Se ratifica con nuestras moléculas imán. Son tan pequeñas, que su magnetismo es cuántico, lo que les confiere unas propiedades fascinantes que quizá quepa aplicar de manera novedosa en la nanoelectrónica del futuro, incluida la computación cuántica. Pero esto es harina de otro costal.

Enrique del Barco
Departamento de Física
Universidad Central de Florida

Cuando falla el riñón

La fibrosis renal subyace bajo numerosas enfermedades. En ella interviene la expresión aberrante de los genes Snail*, que alteran el desarrollo del riñón*

La fibrosis renal constituye el enlace entre la insuficiencia renal progresiva y patologías diversas: glomerulonefritis, diabetes, obstrucción urinaria y rechazo crónico de transplantes renales. La fibrosis es la responsable principal del fallo renal que conduce a la muerte en humanos.

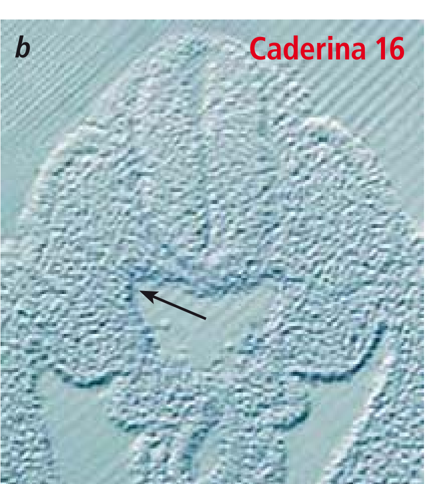
Se sabía que la fibrosis renal se originaba a partir de la activación de fibroblastos que secretaban fibras de colágeno y dificultaban con ello la función normal. (Los fibroblastos son células que sintetizan la sustancia intercelular del tejido conjuntivo embrionario.) Ahora se ha demostrado que las células epiteliales de los túbulos renales sufren un cambio fenotípico que las asemeja a los fibroblastos fibróticos.

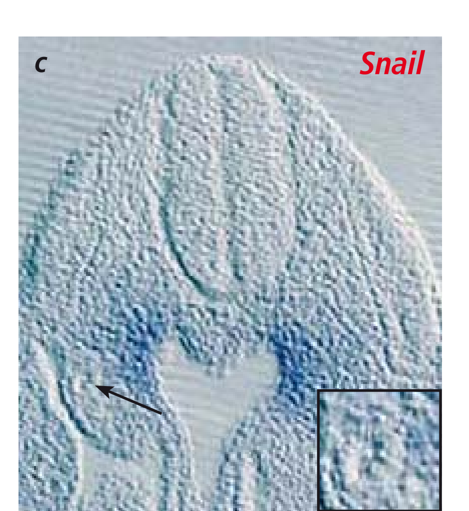
La transformación TEM

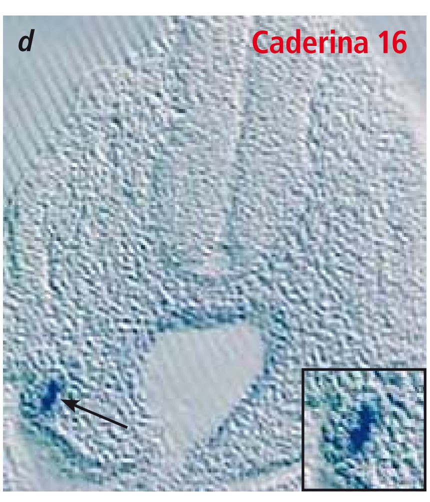
Ese cambio celular corresponde al proceso de transición epitelio-mesénquima (TEM), por el que las células pierden los marcadores característicos del epitelio (caderinas) para convertirse en células mesenquimáticas, capaces de soltarse unas de otras y desenvolverse libres. Los genes *Snail* desarrollan una función clave en la inducción de ese proceso celular durante el desarrollo embrionario. También, en la progresión tumoral.

Nuestras investigaciones muestran que *Snail* debe permanecer inactivo en el riñón adulto, ya que su activación aberrante en riñones adultos induce fibrosis. Esos datos, obtenidos en experimentos sobre modelos animales y sobre muestras de

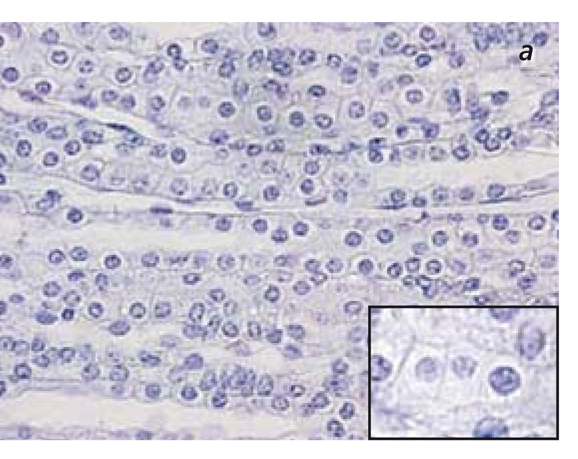


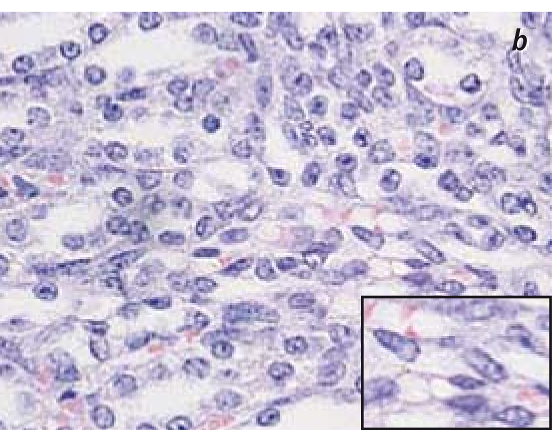






1. Cuatro secciones de embriones de ratón muestran el desarrollo normal del riñón: en los estadios iniciales se detecta la activación de *Snail* (*a*) y la ausencia de caderina (*b*); al iniciarse la epitelización, se desactiva *Snail* (*c*) y aparece la caderina (*d*), lo que permite la formación de los epitelios de los túbulos renales corticales y medulares.





2. Médula de riñón adulto normal (*a*) y fibrótico (*b*). La expresión aberrante de *Snail* en el riñón adulto provoca la destrucción de los túbulos y fibrosis renal.

origen humano, elevan a los genes *Snail* al rango de agentes etiológicos de la fibrosis renal.

Los riñones forman parte del sistema urinario: filtran la sangre y facilitan la eliminación de los residuos a través de la orina. Se hallan asimismo implicados en la regulación del equilibrio electrolítico y estimulan la producción de hematíes. La filtración se produce en las nefronas, pequeñas unidades del riñón. Cada nefrona consta de un glomérulo (capilar) y un túbulo (tubo colector). En los mamíferos, el riñón definitivo se forma a partir del mesodermo intermedio. La diferenciación de ese tejido viene mediada por mecanismos del tipo transición mesénquima-epitelio (TME); de ese modo, las células mesenquimáticas del blastema se diferencian en las células epiteliales de las nefronas. Se trata del proceso inverso al de la transición epitelio-mesénquima (TEM), el mecanismo implicado en la aparición de la fibrosis renal.

La función de *Snail*

En el transcurso de los trabajos realizados durante los últimos doce años en el laboratorio de Angela Nieto comprendimos que los genes *Snail* promovían la TEM durante el desarrollo embrionario (formación de mesodermo y salida de la cresta neural, entre otros procesos) y en procesos patológicos (metástasis en tumores de origen epitelial). Desconocíamos, sin embargo, la función de tales genes en el desarrollo y la patología del riñón.

En fecha reciente, hemos descubierto que los miembros de la familia *Snail* se expresan en el primordio renal, pero deben apagarse luego para que tenga lugar la correcta formación de las nefronas. Si esos genes se reactivan en el riñón adulto, inducen un TEM capaz de generar fibrosis renal.

Snail opera mediante la represión de los marcadores epiteliales de las células renales, incluido HNF1β, un potente inductor de la caderina 16, la proteína de adhesión encargada de mantener las estructuras epiteliales de los riñones. *Snail* impide la aparición de HNF1β y, con ello, la formación de las estructuras epiteliales renales durante el desarrollo. Si *Snail* está activo en el riñón adulto, induce la desaparición de los túbulos renales y los túbulos colectores. En ese último caso, se altera la homeostasis del tejido y, por tanto, la funcionalidad del riñón.

Actualmente se conoce que el factor TGFβ y otras citoquinas, que se secretan en respuesta a distintas patologías, tienen capacidad para inducir fibrosis renal. Dado que la lesión fibrótica conlleva disfunción renal, urge el desarrollo de estrategias para su tratamiento. El bloqueo de TGFβ constituye una de las vías preventivas propuestas. Sabemos ahora que TGFβ es un potente inductor de *Snail* y que los riñones fibróticos procedentes de pacientes sometidos a nefrectomía (extirpación del riñón) tras fracaso renal presentan niveles elevados de *Snail*.

En nuestro laboratorio hemos descubierto que la simple activación de *Snail* desencadena, en ratones transgénicos, todas las alteraciones morfológicas y bioquímicas propias de la fibrosis. Ello nos lleva a proponer que la inhibición de *Snail* en el parénquima renal del adulto puede ofrecer una estrategia terapéutica más específica para las lesiones fibróticas. Este trabajo aporta un ejemplo del modo en que la biología del desarrollo ilumina las patologías humanas, ya que el estudio de la ontogenia del riñón ha facilitado la comprensión de mecanismos moleculares que conducen a la disfunción de este órgano.

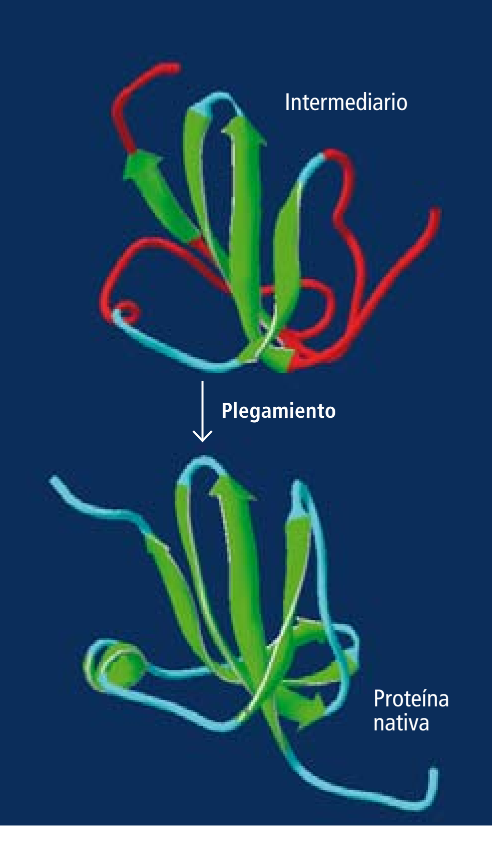
Cristina Alvarez de Frutos
y Agnès Boutet
Instituto de Neurociencias de Alicante,
CSIC-UMH, San Juan de Alicante

El plegamiento de las proteínas

Mediante un entramado de reacciones químicas, determinado por la secuencia aminoacídica, cada proteína adopta su conformación nativa funcional

Las proteínas corresponden a heteropolímeros lineales de aminoácidos. Se sintetizan en los ribosomas. Experimentan luego un proceso de plegamiento, mediante el cual adquieren una estructura tridimensional compacta y característica: el estado nativo. Se trata de la conformación más estable y la única, entre un universo de posibilidades, que permite que la proteína lleve a cabo su función biológica. Una proteína mal plegada carece de funcionalidad y, quizá más importante todavía, puede formar agregados insolubles y tóxicos, como sucede en las enfermedades de Alzheimer o Parkinson.

A pesar de tratarse de un proceso de enorme complejidad, el plegamiento de las proteínas se rige por un código unidimensional. Cada proteína posee una secuencia de aminoácidos distintiva. La secuencia aminoacídica determina la estructura nativa de la proteína y muestra el camino que ha de seguir para



El plegamiento lleva a una proteína hasta su forma nativa. Pueden capturarse las estructuras intermedias que se generan durante el proceso y, en casos excepcionales, determinarse la estructura molecular de las mismas. Se identifican así las regiones de la proteína que se pliegan inicialmente. Esas zonas operan a modo de núcleo sobre el cual se estructura el resto de la proteína.

La figura corresponde a un intermediario y la forma nativa de una proteína. En la proteína nativa se muestran los dominios rígidos (*verde*) y los flexibles (*azul*). Se aplica el mismo código para el intermediario, donde se muestran también las regiones que todavía no han alcanzado la estructura nativa (*rojo*). La primera zona en estructurarse es la central; se acomodan luego sobre ésta las zonas periféricas (*rojo*), para dar lugar a una proteína estable y funcional.

construirla. Ello implica que el plegamiento es un proceso espontáneo. En el interior de la célula se alojan las chaperonas moleculares, proteínas que facilitan el plegamiento. Aumentan la velocidad y la eficiencia del proceso, sin alterar el camino ni el producto final (la estructura nativa y funcional).

Como todo proceso biológico, el plegamiento proteico se desarrolla bajo control termodinámico. En el camino que va desde las múltiples conformaciones del estado desplegado en que nace una proteína hasta la estructura nativa única, se produce una caída neta de entropía. Semejante disminución entrópica se ve compensada por un aumento de entalpía, gracias a la formación de numerosas interacciones débiles que estabilizan la estructura tridimensional nativa y por el secuestro de los aminoácidos apolares en el interior de la proteína mediante interacciones hidrofóbicas.

Además, ciertas proteínas presentan, en el estado nativo, un tipo de enlace covalente característico: el puente disulfuro. Ese enlace fuerte comporta la unión de dos grupos sulfidrilo (—SH), cada uno de ellos perteneciente a un aminoácido cisteína de la proteína.

En ciertos casos, las interacciones débiles resultan insuficientes para la estabilización de la estructura funcional. Para que la proteína permanezca activa en su contexto biológico, se requiere la formación de puentes disulfuro. Así ocurre en enzimas, factores de crecimiento, hormonas y toxinas que operan fuera de las células o del organismo en donde se han sintetizado; se enfrentan a ambientes extracelulares hostiles, donde abundan agentes oxidantes y enzimas proteolíticos que las pueden inactivar fácilmente. En esas biomoléculas, los puentes disulfuro desempeñan una función protectora: incrementan su estabilidad termodinámica, con el consiguiente aumento de la resistencia y la vida media.

El conjunto de puentes disulfuro que presenta una proteína en su conformación nativa es el resultado del entramado de reacciones covalentes que tienen lugar durante el plegamiento proteico: oxidación (formación), reducción (ruptura) e isomerización de los enlaces disulfuro. Si el plegamiento es ya de por sí un proceso de suma complejidad, la formación de disulfuros supone un reto adicional, pues, al tratarse de interacciones fuertes, el apareamiento incorrecto de cisteínas puede resultar en la acumulación, como mínimo de forma transitoria, de formas mal plegadas, potencialmente tóxicas.

Antes de llegar a la estructura nativa, muchas proteínas pasan por una sucesión de formas intermedias, parcialmente plegadas. Si lográramos aislar y estudiar en detalle esos intermediarios de plegamiento, descubriríamos el modo en que la secuencia aminoacídica determina la estructura y la función de una proteína.

Para nuestra desgracia, esa labor entraña una gran dificultad, pues los intermediarios son demasiado inestables y flexibles para llevar a cabo su purificación y posterior caracterización estructural. Pero sí es posible en un caso: el de las proteínas con disulfuros. De ahí que gran parte de la información que disponemos sobre el mecanismo de plegamiento provenga del estudio de esos polipéptidos.

Tras nacer en el ribosoma, estas proteínas experimentan un "plegamiento oxidativo": desde su estado inicial, reducido y desplegado, llegan a su conformación nativa mediante la formación simultánea de enlaces disulfuro y la compactación en una estructura tridimensional definida. En un experimento típico, una proteína nativa se despliega y se reducen, mediante agentes químicos, los puentes disulfuro; con ello se emula la situación inmediata después de la síntesis en el ribosoma. Se eliminan luego, de forma gradual, los agentes reductores, de suerte que se recuperan las condiciones que favorecen el replegamiento de la proteína a la forma funcional.

La formación de puentes disulfuro requiere un *p*H cercano a la neutralidad; si éste desciende drásticamente en un momento determinado, ya no se podrán entablar nuevos enlaces: se dice que el plegamiento ha quedado "congelado". Para detener el proceso de plegamiento en cualquier instante, a voluntad, basta, pues, con acidificar el medio y aislar así los intermediarios constituidos hasta ese momento, caracterizando las cisteínas que tienen apareadas. Las cisteínas implicadas en un puente disulfuro, así como las regiones adyacentes, deben haberse hallado próximas en el espacio en algún momento del plegamiento, aunque se encuentre alejadas entre sí en la secuencia aminoacídica.

Si localizamos los puentes disulfuro que se han formado en distintos momentos del proceso obtendremos una suerte de película de la sucesión de contactos que se han producido en una proteína hasta adoptar su estructura funcional. Se trata de una información clave para la comprensión del plegamiento proteico a la que difícilmente se puede acceder por otra vía.

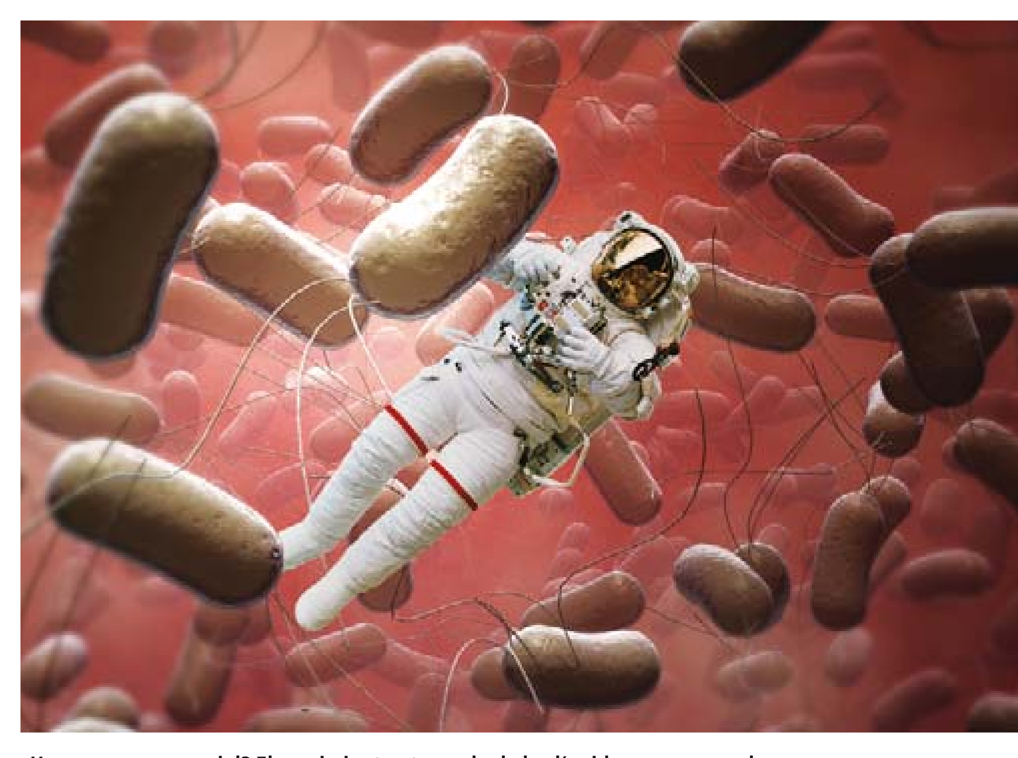
Salvador Ventura Zamora
Dpto. Bioquímica y Biología Molecular,
Instituto de Biotecnología y Biomedicina,
Universidad Autónoma de Barcelona

Orbitas mortíferas

¿Por qué aumentó la letalidad de una bacteria en un viaje espacial?

Las noticias sobre la mayor virulencia de bacterias *Salmonella* al regresar de un viaje espacial corrieron a principios del pasado otoño. Podría bien ser un argumento de una novela de ciencia ficción, pero estos cambios temporales son comunes cuando las bacterias se exponen a nuevos ambientes; ya se los había observado sin necesidad de una nave espacial.

"No se trata de microorganismos mutantes del espacio", insiste Cheryl Nickerson, de la Universidad estatal de Arizona, quien dirige el grupo que envió cultivos a bordo de la lanzadera espacial en septiembre de 2006. "Las bacterias no presentan ningún comportamiento nuevo". El ambiente espacial "reprogramó globalmente la forma en que las bacterias regulaban la expresión de sus genes" y, por consiguiente, las concentraciones de diversas proteínas. De esa manera se adaptan a las condiciones cambiantes.



¿Una amenaza espacial? El movimiento atenuado de los líquidos, como sucede en una nave espacial, causa una mayor virulencia en *Salmonella*.

NASA/*Photo Researchers, Inc.* (*astronauta*); MEDICALRF.COM/CORBIS (*bacterias*)

La ingravidez no representó un factor desencadenante en las bacterias. La fuerza de gravedad no tiene importancia para un microorganismo, en comparación con el golpear constante de su entorno líquido. No obstante, sin la gravedad u otras perturbaciones el líquido de un recipiente para el cultivo bacteriano se estabiliza. Nickerson y sus colaboradores habían simulado en el laboratorio, con anterioridad, tal entorno de cultivo de escaso flujo de cizalla mediante un disco vertical en suave rotación que mantiene a las bacterias suspendidas. En el año 2000 descubrieron que *Salmonella typhimurium*, agente de intoxicación alimentaria transitoria en las personas y fiebre tifoidea mortal en los ratones, se vuelve más virulenta tras haber proliferado en esa microgravedad artificial.

Los investigadores deseaban verificar si se repetiría el mismo fenómeno en el espacio. Para averiguarlo, cultivaron simultáneamente *Salmonella* en la lanzadera espacial y en una cámara del Centro Espacial Kennedy que imitaba las condiciones de la lanzadera. Tras el aterrizaje, inocularon a ratones las bacterias procedentes de un lote de cada ubicación, y comprobaron que las que habían viajado al espacio eran unas tres veces más mortíferas.

James Wilson, un colega de Nickerson, explica que también observaron que la expresión génica, o transcripción de ADN en ARN, difería notablemente en 167 genes distintos. De éstos, "nada más y nada menos" que una tercera parte respondía a una proteína de unión al ARN denominada Hfq. Muchos de esos genes se activan cuando *Salmonella* forma biopelículas, complejos que resisten los antibióticos y las defensas inmunitarias. "Lo que hemos observado", declara Wilson, "correspondería a las fases iniciales" de la formación de la biopelícula.

Las modificaciones básicas en las características celulares podrían ser aún más espectaculares de lo que aparentan, apunta Michael Surette, que estudia la expresión génica en *Salmonella* y otras bacterias en la Universidad de Calgary en Alberta. Aunque no participó en el estudio, sospecha que hay regiones concretas del cultivo espacial sin agitar que originan distintas condiciones. El efecto global podría enmascarar unas alteraciones muy superiores en las bacterias de las zonas en cuestión. "Considero más notable el cambio en la virulencia que el cambio en la expresión genética", añade Surette.

Por el momento, se desconoce si la mayor virulencia supone una amenaza para los astronautas. Pero, según Nickerson, "es incuestionable que este ambiente de cultivo con escaso estrés por líquidos representa un entorno crítico que las células perciben y al que reaccionan". Debido a que las bacterias también experimentan condiciones de bajo estrés en rincones protegidos de los aparatos digestivo y reproductor, espera que actuando contra Hfq se podría retrasar la infección por *Salmonella*. De ese modo, los experimentos realizados en el espacio podrían ayudar a los pacientes en la Tierra. "Algunos de nuestros avances más importantes en el conocimiento del funcionamiento de los sistemas biológicos se han conseguido al estudiarlos en ambientes extremos".

Don Monroe
Berkeley Heights, Nueva Jersey

La génesis de

Considerada antaño la formación planetaria un proceso firmemente determinado hacia una conclusión prevista, se comprueba ahora su auténtico carácter caótico

CONCEPTOS BASICOS

- Apenas hace diez años, quienes estudiaban la formación de los planetas tenían que basar sus teorías en el ejemplo único de nuestro sistema solar. Ahora se conocen docenas de sistemas, maduros o en gestación. No hay dos iguales.
- La idea básica tras de la teoría más aceptada sobre la formación planetaria —granos pequeños que se agrupan y atrapan el gas— encierra muchos niveles de complejidad. Un juego caótico de mecanismos competitivos conduce a una enorme diversidad de sistemas planetarios.

Desde un punto de vista cósmico, los planetas sólo son escombros, irrelevantes en el contexto imponente de la historia de la expansión de los cielos. Sin embargo, pocos objetos hay más diversos y complejos en el universo. Ninguna otra clase de cuerpos soporta tal entrecruzarse de procesos astronómicos, geológicos, químicos y biológicos. Ningún otro lugar del cosmos podría albergar la vida que conocemos. La diversidad de los mundos de nuestro sistema solar es extraordinaria. Aun así, nos han asombrado los descubrimientos de los últimos diez años, en los que se han encontrado más de 200 planetas.

La amplia variedad de su masa, tamaño, composición química y órbita constituye un reto para quienes investigan sus orígenes. Cuando el autor preparaba el doctorado en los años setenta, predominaba la idea de que la formación planetaria era un proceso determinista y bien ordenado, una cadena de ensamblaje que convertía discos amorfos de gas y polvo en copias de nuestro sistema solar. Hoy sabemos que se trata de un proceso caótico, con resultados muy diferentes para cada sistema. Los mundos que emergen son los supervivientes de una barahúnda de mecanismos que compiten por crear y destruir. Muchos planetas se despedazan, se precipitan contra los fuegos de la estrella naciente o parten al espacio interestelar. Nuestra propia Tierra podría tener hermanos perdidos que vagan desde hace mucho por el oscuro vacío.

El estudio de la formación de planetas yace en la intersección de la astrofísica, las ciencias planetarias, la mecánica estadística

los planetas

Douglas N. C. Lin

Ilustraciones de Don Dixon

y la dinámica no lineal. A grandes rasgos, hay dos teorías principales. La teoría de la acreción secuencial sostiene que los granos de polvo, minúsculos, se agrupan y crean pepitas sólidas de piedras que atrapan cantidades ingentes de gas hasta convertirse en gigantes como Júpiter, o no, y se quedan en planetas rocosos como la Tierra. En contra de este modelo cuentan la lentitud del proceso y la posibilidad de que todo el gas se disperse antes de que los planetas estén construidos.

La teoría de la inestabilidad gravitatoria sostiene que los gigantes gaseosos toman su forma súbitamente cuando se fractura el disco de gas y polvo. Este proceso reproduciría en miniatura la formación de las estrellas. Una hipótesis controvertida, pues presupone la existencia de condiciones muy inestables que quizá no se den en la realidad. Se ha visto que entre los planetas más pesados y las estrellas más ligeras hay un "desierto", una escasez de objetos de masa intermedia. Nos indica esa discontinuidad que los planetas no son estrellas pequeñas; tienen un origen muy distinto.

Aunque el debate persiste, muchos conceden mayor plausibilidad a la teoría de la acreción secuencial. En el artículo me centraré en ella.

UN EMBRION DE PLANETA GIGANTE atrapa gas del disco alrededor de una estrella recién formada.

1. Colapso de una nube interestelar

Tiempo: 0 (punto inicial de la secuencia de la formación planetaria)

Nuestro sistema solar pertenece a una galaxia que tiene unos cien mil millones de estrellas, inmersas en nubes de gas y polvo, este último procedente en parte notable de los desechos de generaciones estelares previas. Aquí, "polvo" significa "fragmentos microscópicos, expulsados al espacio interestelar, de agua helada, hierro y otras sustancias sólidas condensadas en las capas exteriores y frías de las estrellas". Cuando las nubes alcanzan una densidad suficientemente alta a una temperatura suficientemente baja, pueden derrumbarse sobre sí mismas bajo la fuerza de la gravedad y formar cúmulos de estrellas, proceso que necesita de cien mil a escasos millones de años [*véase* "Los primeros días en la vida de una estrella", por Thomas P. Ray; Investigación y Ciencia, octubre 2000].

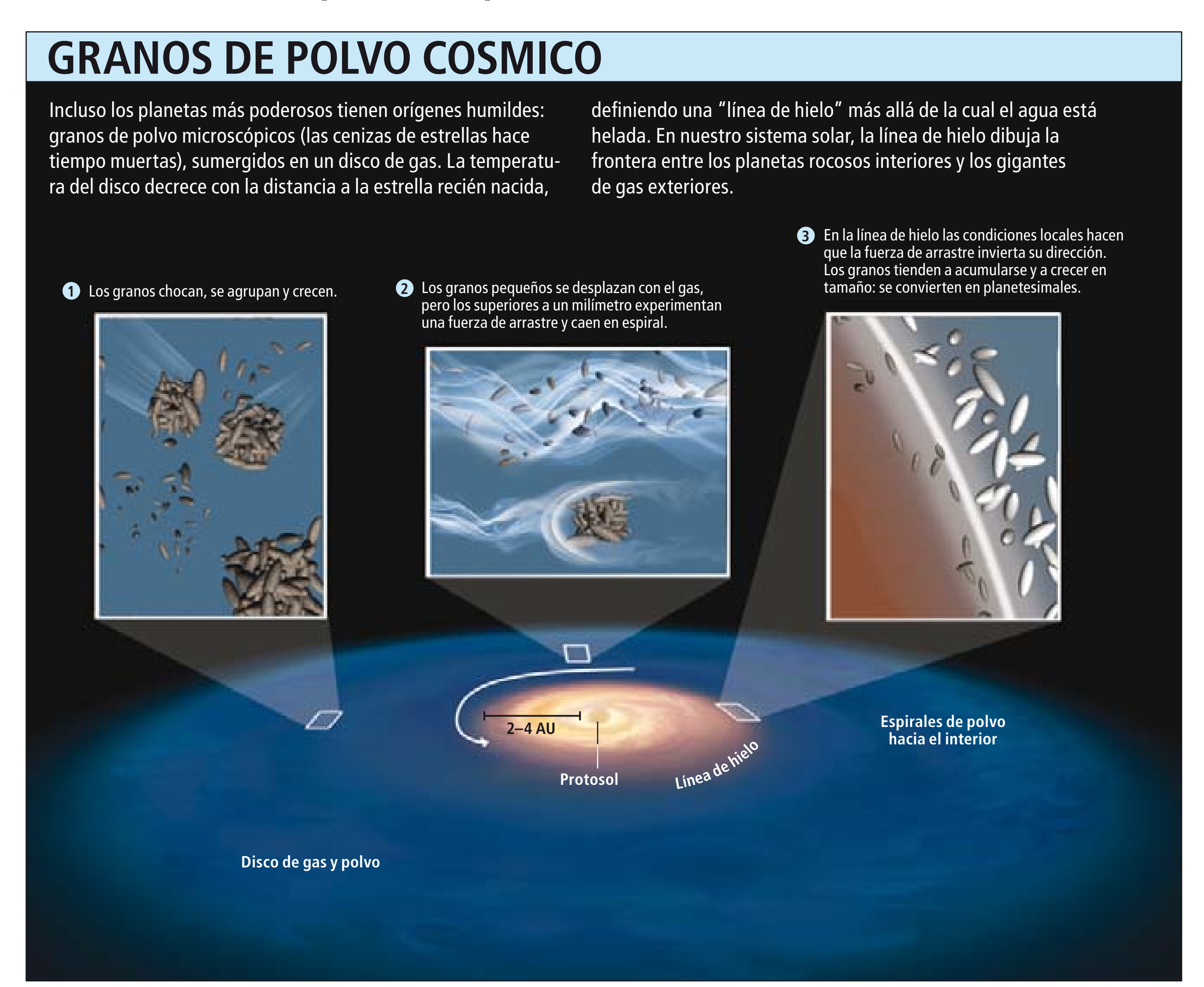
Alrededor de cada estrella encontramos un disco de materia residual, sin el cual no se podrían fabricar planetas. Los discos recién formados contienen sobre todo hidrógeno y helio gaseosos. En sus regiones más internas y calientes, los granos del polvo se hallan en forma de vapor; en las más exteriores y tenues, las partículas de polvo sobreviven y crecen a medida que el vapor se condensa sobre ellas.

Muchas estrellas jóvenes se rodean de discos de esas características. Las estrellas con edades de entre uno y tres millones de años tienen discos ricos en gas, mientras que los discos de las estrellas de más de diez millones de años son exiguos y pobres en gas, disipado ya por la nueva estrella o por estrellas vecinas muy brillantes. Este lapso temporal define el intervalo en que se forman los planetas. La cantidad de elementos pesados en los discos es equiparable a la masa de los mismos en los planetas del sistema solar. Se trata de un indicio importante de que los planetas surgieron de tales estructuras.

Resultado final: una estrella recién nacida rodeada de gas y de granos de polvo de unas micras de espesor.

GRANOS DE POLVO COSMICO

Incluso los planetas más poderosos tienen orígenes humildes: granos de polvo microscópicos (las cenizas de estrellas hace tiempo muertas), sumergidos en un disco de gas. La temperatura del disco decrece con la distancia a la estrella recién nacida, definiendo una "línea de hielo" más allá de la cual el agua está helada. En nuestro sistema solar, la línea de hielo dibuja la frontera entre los planetas rocosos interiores y los gigantes de gas exteriores.



2. Autorregulación del disco

Tiempo: alrededor de un millón de años

El gas agita los granos de polvo de los discos protoplanetarios; chocan entonces entre sí y se adhieren unos a otros o se rompen. Los granos interceptan la luz estelar y la reemiten en longitudes de onda del infrarrojo cercano. De esa forma, el calor llega hasta las regiones más oscuras del interior del disco. La temperatura, densidad y presión del gas disminuyen con la distancia a la estrella. La combinación de la presión, la rotación y la gravedad promueve que la rotación del gas en torno a la estrella proceda algo más despacio que un cuerpo independiente que se encuentre a la misma distancia.

En consecuencia, los granos de polvo con tamaño superior a unos milímetros tienden a dejar atrás el gas. Por ello se enfrentan a un viento de cara que los frena y hace caer en espiral hacia la estrella. Cuanto más crezca un grano, más rápida será su caída en espiral. Los grumos de un metro pueden acortar a la mitad su distancia a la estrella en unos mil años.

A medida que se aproximan a la estrella, los granos se calientan. Con el tiempo, las sustancias volátiles —el agua y otras sustancias de bajo punto de ebullición— se evaporan. La distancia a la que esto ocurre, "la línea de hielo", se halla a una distancia de entre 2 y 4 unidades astronómicas (UA) de la estrella; en nuestro sistema solar cae entre las órbitas de Marte y Júpiter. (El radio de la órbita de la Tierra es 1 UA.) La línea de hielo divide al sistema planetario en una región interna, pobre en volátiles y repleta de cuerpos rocosos, y en una región más externa, rica en volátiles y con cuerpos helados.

Las moléculas de agua terminan acumulándose en la línea de hielo, una vez se han evaporado de los granos. Esta acumulación acuosa provoca una cascada de efectos. Crea una discontinuidad en las propiedades del gas que está en la línea porque causa una caída de la presión. El balance de fuerzas hace que el gas acelere su giro alrededor de la estrella. Como consecuencia, los granos no reciben en ese entorno un viento de cara, sino de cola: ganan velocidad y se frena su desplazamiento hacia el interior. Pero siguen llegando granos desde las regiones exteriores del disco; se agregan en la línea de hielo, línea que termina por transformarse en un verdadero banco de hielo.

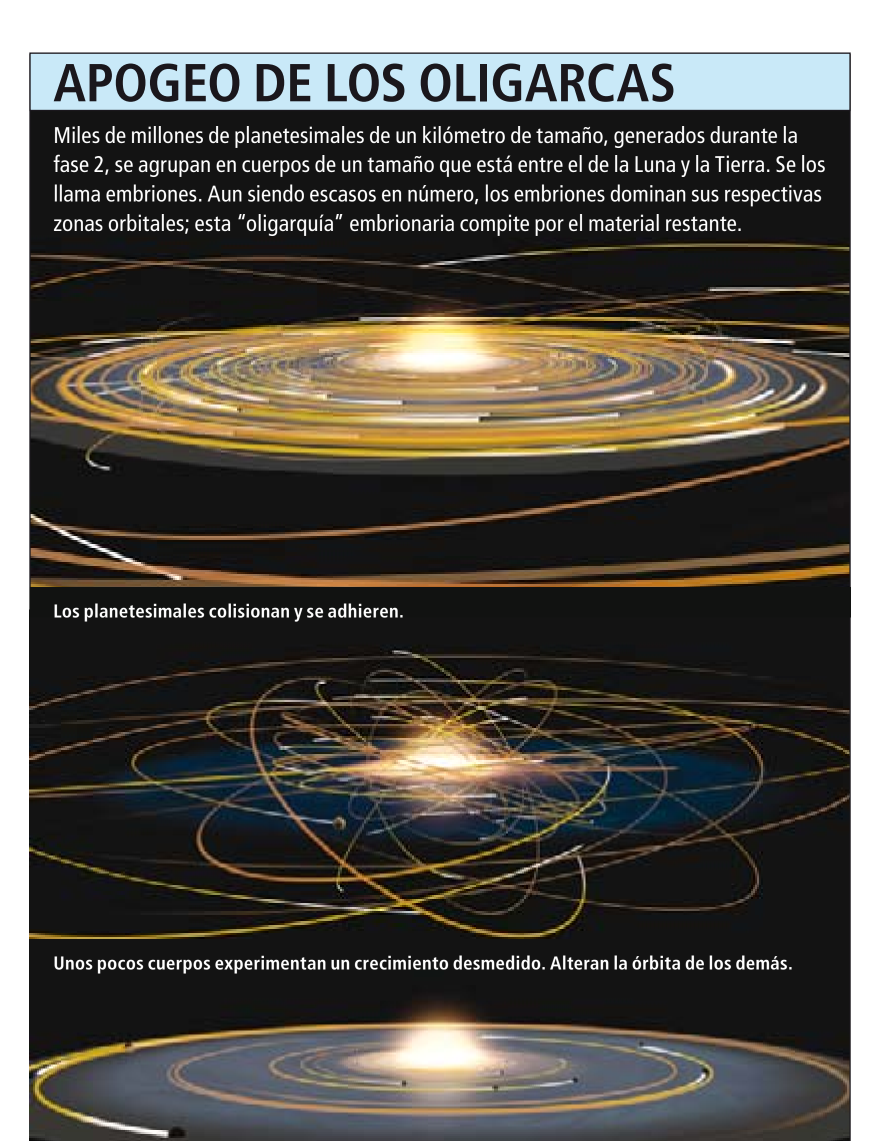
Con esa proximidad mutua, los granos colisionan y crecen. Algunos atraviesan la línea de hielo y siguen hacia el interior, pero adquieren en el proceso un revestimiento de lodo y de moléculas complejas que los vuelve más pegajosos. Algunas regiones llegan a ser tan densas, que la atracción gravitatoria colectiva de los granos acelera aún más su crecimiento.

De esta manera, los granos de polvo se agrupan para formar cuerpos que miden unos kilómetros; se los llama planetesimales. Al final de esta fase de la formación planetaria, los planetesimales habrán barrido casi todo el polvo original. Es difícil observarlos directamente, pero se puede inferir su presencia por los residuos que se producen en sus colisiones.

Resultado final: enjambres de bloques que miden varios kilómetros. Se les denomina planetesimales.

APOGEO DE LOS OLIGARCAS

Miles de millones de planetesimales de un kilómetro de tamaño, generados durante la fase 2, se agrupan en cuerpos de un tamaño que está entre el de la Luna y la Tierra. Se los llama embriones. Aun siendo escasos en número, los embriones dominan sus respectivas zonas orbitales; esta "oligarquía" embrionaria compite por el material restante.



Los planetesimales colisionan y se adhieren.

Unos pocos cuerpos experimentan un crecimiento desmedido. Alteran la órbita de los demás.

Los embriones agotan el material original y cesan de crecer.

3. Germinación de embriones planetarios

Tiempo: de 1 a 10 millones de años

Los paisajes salpicados de cráteres de Mercurio, la Luna y los asteroides no dejan lugar a dudas: los sistemas planetarios nacientes son galerías

¿TIENE SENTIDO JUPITER?

De todas las etapas de la formación planetaria, el nacimiento del primer gigante de gas es, en muchos aspectos, la peor conocida. Uno de los misterios estriba en la pequeñez, o incluso inexistencia, del núcleo de Júpiter. Su masa es mucho menor que la masa crítica que se creía necesaria para enfriar y asentar el gas incorporado por acreción. Debió de intervenir algún otro mecanismo: por ejemplo, la disipación de calor en un disco en miniatura alrededor del protojúpiter. Cabe otra vía alternativa: los flujos del gas interior podrían haber erosionado el núcleo original de Júpiter.

Según los cálculos teóricos, el protojúpiter tuvo que migrar hacia el interior del sistema solar a una velocidad mayor que el ritmo a que atrapaba gas. Algo debió frenar su movimiento: diferenciales en la presión del gas, flujos gaseosos, turbulencias o interacciones gravitatorias entre los embriones.

de tiro. Los choques de unos planetesimales con otros pueden hacer que crezcan o que se despedacen. El balance entre la coagulación y la fragmentación conduce a una distribución de tamaños: a los cuerpos menores les toca la mayor parte del área de los nuevos sistemas, y a los mayores, la mayor parte de la masa. Las órbitas podrían ser inicialmente elípticas, pero el arrastre por el gas y las colisiones tienden a volverlas circulares.

Al principio, el crecimiento de un cuerpo se autorrefuerza. Cuanto mayor sea un planetesimal, mayor será la atracción gravitatoria que ejercerá y la velocidad a la que atrapará a sus compañeros más pequeños. Para cuando alcance una masa equiparable a la de la Luna, sin embargo, su gravedad será tan intensa, que agitará el material sólido que haya a su alrededor y lo dispersará en su mayor parte antes de que pueda chocar contra él. De esta manera los objetos protoplanetarios ponen un límite a su propio crecimiento y aparece una "oligarquía", una población de embriones planetarios con masas parecidas que compiten entre ellos por los planetesimales que queden.

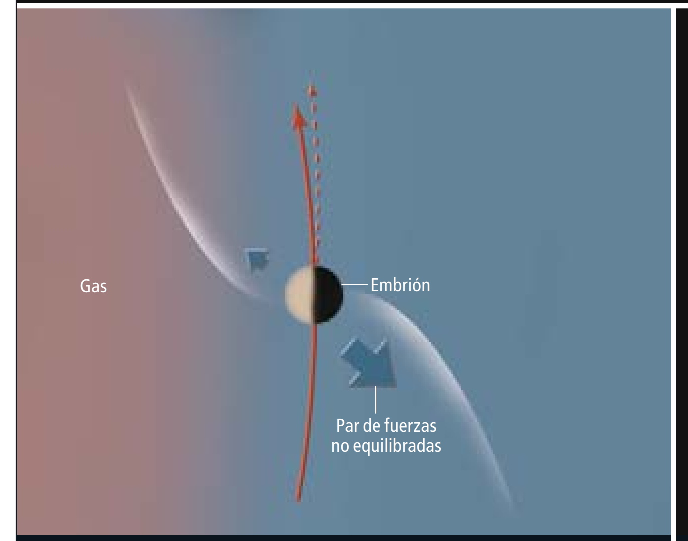
La zona de avituallamiento de cada embrión dibuja una banda estrecha centrada en su órbita. El crecimiento se paraliza una vez se ha atrapado a la mayoría de los planetesimales residuales de la zona. Por simple geometría, el tamaño de la zona y la duración del avituallamiento aumentan con la distancia a la estrella. A una separación de 1 UA, los embriones se estabilizan, antes de los primeros 100.000 años, en unas 0,1 masas de la Tierra. A 5 UA y una edad de pocos millones de años, los embriones alcanzan cuatro veces la masa de la Tierra. Los embriones pueden crecer aún más cuando están cerca de la línea de hielo o en los bordes de los vacíos que haya en el disco; también en éstos tienden los planetesimales a acumularse.

El crecimiento oligárquico provoca la aparición de un excedente de aspirantes a planetas. Sólo unos pocos lograrán ese destino. Podría parecer que los planetas del sistema solar están muy separados entre sí, pero en realidad se hallan tan juntos como resulta posible. La inserción de un planeta terrestre en el espacio interplanetario de nuestro sistema, tal y como es hoy día, desestabilizaría todos los planetas. Ante una taza de café llena hasta el mismo borde cabe pensar que alguien echó de más y derramó algo de café; llenar la taza exactamente hasta el borde sin que se derrame ni una gota parece poco probable. De manera análoga, los sistemas planetarios empiezan con más materia que la retenida al final. Se expulsan cuerpos hasta que el sistema alcanza una configuración de equilibrio. Se han observado planetas que flotan libremente en cúmulos estelares jóvenes.

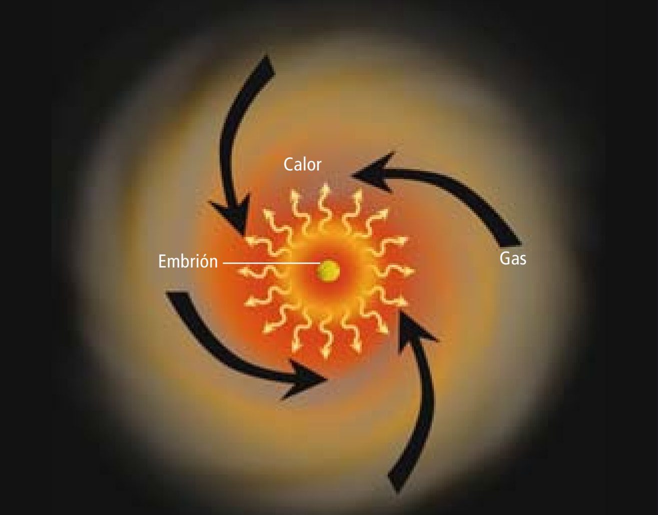
Punto final: "oligarquía" de embriones planetarios con masa entre la lunar y la terrestre.

UN SALTO GIGANTE PARA LOS PLANETAS

La formación de un gigante de gas como Júpiter es un momento crítico en la historia de un sistema planetario; si surge un planeta así, moldeará el resto del sistema. Mas, para que suceda, un embrión debe acumular gas a un ritmo mayor que la velocidad con la que cae en espiral.



En contra de la formación del planeta gigante operan las ondas que él mismo genera en el gas que le rodea. Estas ondas ejercen sobre el planeta pares de fuerza no equilibrados, lo frenan y encogen su órbita.



La gravedad del planeta atrae el gas, pero éste no puede asentarse hasta que no se haya enfriado. El planeta podría caer en espiral hacia la estrella antes de que esto suceda. La formación de un gigante quizá tenga éxito sólo en una minoría de los sistemas planetarios.

4. Nace un gigante de gas

Tiempo: de 1 a 10 millones de años

Júpiter debió de empezar con una semilla de tamaño similar a la Tierra. Luego acumuló unas 300 masas terrestres de gas. Semejante crecimiento depende de varios efectos contrapuestos. La gravedad del embrión atrae al gas del disco, pero el gas libera energía en su caída y debe enfriarse para que se asiente. En consecuencia, el ritmo de crecimiento planetario dependerá de la eficiencia enfriadora. Si el enfriamiento es demasiado lento, la estrella podría disipar el gas del disco antes de que el embrión pueda desarrollar una atmósfera espesa. El principal cuello de botella para la liberación de calor es el flujo de radiación a través de las capas exteriores de la atmósfera emergente, que a su vez viene determinado por la opacidad del gas (dada por su composición) y por el gradiente de temperaturas (que depende sobre todo de la masa inicial del embrión).

Según los primeros modelos, los embriones necesitan una masa crítica de unas 10 veces la masa de la Tierra para que haya una transferencia rápida de calor. Estos embriones tan grandes surgirían cerca de la línea de hielo, donde el material se habría ido acumulando con anterioridad. Esta podría ser la razón de que Júpiter esté justo más allá de la línea de hielo del sistema solar. Los gigantes pueden aparecer en cualquier otro sitio si el disco contiene más materia original de lo que se presupone. Se han observado ya muchas estrellas con discos unas cuantas veces más densos de lo que se venía concediendo. La transferencia de calor no representaría entonces un problema insuperable.

Otro factor que opera en contra de los gigantes gaseosos es la tendencia de los embriones a caer en espiral hacia la estrella. En la llamada migración de tipo I, el embrión crea una onda en el disco gaseoso, una onda que, a su vez, tira gravitatoriamente de la órbita del disco. La onda sigue al planeta como la estela al barco. El gas en el lado más alejado de la estrella gira más despacio que el embrión y actúa como si lo aprehendiera por detrás y lo frenase. Mientras tanto, el gas de la parte interior de la órbita gira más deprisa y empuja al embrión hacia delante; lo acelera. La región exterior, al ser mayor, vence en ese tira y afloja, y lleva al embrión a perder energía y a recorrer varias unidades astronómicas hacia la estrella, en un millón de años. Esta migración tiende a pararse en torno a la línea de hielo, donde el gas de cara se convierte en viento de cola y proporciona al embrión un impulso adicional en su órbita. Podría esconderse en ello otra razón de la ubicación en que se encuentra Júpiter.

El crecimiento del embrión, su migración y la depleción del gas ocurren más o menos a un mismo ritmo. Cuál de esos factores ganará, dependerá de la suerte. Pudiera ser que se iniciasen varias generaciones de embriones que sólo migraran y no completasen el proceso. Siguiendo su estela se desplazarían otras tandas de nuevos planetesimales, procedentes de regiones aún más exteriores del disco; se repetirían todos los pasos hasta que se crease un gigante de gas o hasta que el gas se perdiera y no se pudiese formar un gigante. Se han encontrado planetas con masas como las de Júpiter en sólo un 10 por ciento de las estrellas de tipo solar investigadas. Los núcleos de estos planetas constituirían los pocos supervivientes de muchas generaciones de embriones.

El balance final entre los diferentes procesos depende de la dotación inicial de material del sistema. Casi la tercera parte de las estrellas ricas en elementos pesados albergan planetas de la masa de Júpiter. Cabe presumir que estas estrellas tuvieron discos más densos y crearon embriones mayores y que se evitó, de ese modo, el cuello de botella de la transferencia de calor. Se encuentran menos planetas gigantes en torno a estrellas pobres en elementos pesados.

Iniciada la fase de crecimiento, se acelera a un ritmo asombroso. En unos mil años, un planeta de la masa de Júpiter puede alcanzar la mitad de su masa final. En el proceso disipa tanto calor, que brilla más que su estrella durante un pequeño lapso de tiempo. El planeta se estabiliza cuando llega a la masa suficiente para invertir la migración de tipo I. En lugar de que el disco altere la órbita del planeta, el planeta modifica la órbita del gas en el disco. El gas del interior de la órbita planetaria gira más rápido que el planeta, por lo que la gravedad de éste tiende a tirar de él, haciendo que caiga hacia la estrella; esto es, el gas se aleja del planeta. El gas exterior a la órbita planetaria gira más lentamente; el planeta tiende a acelerarlo y a llevarlo hacia afuera. Es decir, el gas se aleja del planeta. En consecuencia, el planeta abre un hueco en el disco y corta todo su suministro de materia original. El gas intenta repoblar el hueco, pero las simulaciones por computadora indican que el planeta vencerá en la batalla si su masa es mayor que la de Júpiter, aproximadamente, a 5 UA.

Esta masa crítica depende de los tiempos del proceso. Cuanto antes se forme el planeta, tanto mayor será, ya que aún quedará bastante gas en el disco. Saturno quizá sea más pequeño que Júpiter por la sencilla razón de que se formó unos millones de años más tarde. Se ha observado una escasez de planetas entre las 20 masas terrestres (la masa de Neptuno) y

El autor

Douglas N. C. Lin, al igual que muchos científicos de su generación, remonta su pasión por la astronomía al lanzamiento del satélite artificial *Sputnik* en 1957. Nacido en Nueva York, creció en Pekín y asistió a la Universidad McGill en Montreal, obtuvo el doctorado en la Universidad de Cambridge, realizó estudios posdoctorales en la Universidad de Harvard, para finalmente enseñar en la Universidad de California en Santa Cruz. Es el director fundador del Instituto de Astronomía y Astrofísica Kavli, de la Universidad de Pekín.

LA LINEA TEMPORAL EN LA FABRICACION DE PLANETAS

Basándose en la datación radiométrica de los meteoritos y en las observaciones de discos alrededor de otras estrellas, se ha deducido un calendario aproximado de la génesis planetaria.

De 0 a 100.000 años: la estrella se forma en el centro del disco y comienza la fusión nuclear.

De 100.000 a 2 millones de años: los granos de polvo se agrupan en embriones planetarios cuya masa cae entre la masa lunar y la terrestre.

2 millones de años: se forman los primeros gigantes de gas, que barren la primera generación de asteroides.

10 millones de años: los gigantes de gas propician la génesis de otros planetas gigantes así como terrestres; la mayor parte del gas se ha perdido ya.

800 millones de años: la recolocación de los planetas continúa hasta pasados mil millones de años desde el comienzo.

las 100 (la masa de Saturno): podría indicar cuáles fueron los tiempos del proceso.

Punto final: un planeta del tamaño de Júpiter (o no).

5. Un gigante de gas inquieto

Tiempo: de 1 a 3 millones de años

Curiosamente, muchos de los planetas extrasolares descubiertos en los últimos diez años presentan órbitas muy ceñidas a sus estrellas, mucho más que la de Mercurio al Sol. Estos "jupíteres calientes" no pueden haberse formado en sus órbitas actuales, aunque sólo fuere por la parvedad de las zonas de avituallamiento orbitales, insuficiente para poder ofrecer el material requerido. Su existencia demanda, así parece, una secuencia en tres partes que por alguna razón no se produjo en nuestro sistema solar.

Primero, el gigante de gas debe desarrollarse en la región interna del sistema planetario, cerca de la línea de hielo, mientras el disco aún contiene una gran cantidad de gas. Esto exige una alta concentración de material sólido en el disco.

Segundo, el planeta gigante debe desplazarse hasta su posición actual. No lo hará con una migración de tipo I, característica de embriones que aún no han capturado mucho gas. Ha de tratarse de una migración de tipo II. El planeta recién formado abre un hueco en el disco e impide cualquier flujo de gas a través de su órbita. Debe entonces luchar contra la tendencia expansiva del gas turbulento de las regiones adyacentes. El gas intenta siempre entrar en el hueco; esta difusión hacia la estrella central fuerza al planeta a perder energía orbital. El proceso, lento, necesita unos cuantos millones de años para desplazar un planeta unas pocas unidades astronómicas. Por ese motivo el planeta ha de engendrarse en la región interna del sistema si quiere acabar abrazando la estrella. A medida que un planeta se desplaza hacia el interior va apartando de su camino los planetesimales y embriones residuales. Quizá se creen así "tierras calientes" de órbita muy ceñida.

Tercero, tiene que haber alguna entidad que detenga la migración antes de que el planeta se precipite en la estrella. El campo magnético estelar podría limpiar de gas la cavidad inmediata a la estrella; sin gas cesa la migración. Cabe un proceso alternativo: el planeta ejerce fuerza de marea sobre la estrella y la estrella, a su vez, tensa la órbita planetaria. Estos salvavidas quizá no actúen en todos los sistemas. Muchos planetas terminarán seguramente por caer en la estrella.

Punto final: un planeta gigante en una órbita corta ("Júpiter caliente").

¿COMO ABRAZAR UNA ESTRELLA?

En muchos sistemas, se forma un planeta gigante y cae en espiral a lo largo del camino que le separaba de la estrella. La razón es que el gas del disco pierde energía por la fricción interna y cae, llevándose al planeta consigo. Con el tiempo el planeta se aproxima demasiado a la estrella, que ejerce sobre su órbita un par de fuerzas estabilizador.



6. Otros planetas gigantes se suman a la familia

Tiempo: de 2 a 10 millones de años

Si por fin se crea un gigante gaseoso, facilitará la aparición de otros gigantes. Muchos, si no la mayoría, de los planetas gigantes conocidos tienen hermanos de masa equiparable. En nuestro sistema solar, Júpiter ayudó a que Saturno se formara más deprisa. También propició la creación de Urano y Neptuno, ya que sin Júpiter nunca hubieran crecido hasta alcanzar sus tamaños actuales. A la distancia a que se encuentran, cualquier proceso de formación sin ayuda es tan lento, que el disco se habría disipado mucho antes de que hubiesen terminado de constituirse. Sólo habría dejado tras de sí mundos atrofiados.

Los gigantes de gas que primero aparecen cumplen varios servicios. El material se acumula en el borde exterior del hueco que abren en el disco por las mismas razones que en la línea de hielo: la diferencia de presión hace que el gas se acelere y actúe sobre los granos y los planetesimales como un viento de cola que detiene su migración desde regiones del disco más lejanas. Por otra parte, la gravedad del primer gigante gaseoso tiende a dispersar los planetesimales cercanos hacia otras regiones del sistema, donde podrán formar nuevos planetas.

La segunda generación de planetas surge del material que el primer gigante ha amontonado. El momento en que ocurra cada paso adquiere una importancia crítica; bastan pequeños cambios en la escala temporal para que haya diferencias notables en los resultados. En el

caso de Urano y Neptuno, la acumulación de planetesimales resultó óptima. Los embriones alcanzaron tamaños enormes, entre 10 y 20 veces la masa de la Tierra, lo que retrasó el inicio de la acreción de gas, que se produjo cuando ya quedaba poco de éste. Estos cuerpos terminaron con apenas dos masas terrestres de gas. No son gigantes gaseosos, sino gigantes de hielo, posiblemente el tipo más común de planeta gigante.

Los campos gravitatorios de los planetas de segunda generación introducen complicaciones en el sistema. Si los cuerpos se forman próximos entre sí, la interacción mutua y con el disco gaseoso podrán catapultarlos hacia nuevas órbitas muy elípticas. En nuestro sistema solar, todos los planetas presentan órbitas casi circulares y la distancia entre ellos los deja a salvo de la influencia de los vecinos. En otros sistemas planetarios, sin embargo, las órbitas elípticas constituyen la regla. En algunos, son resonantes; esto es, los períodos orbitales se hallan relacionados mediante un número entero pequeño. Nacer con esta característica es bastante improbable, pero pudiera ocurrir que surja de manera natural con la migración de los planetas y su final acoplamiento gravitatorio. La diferencia entre estos sistemas y el nuestro estribaría en la cantidad inicial de gas.

La mayoría de las estrellas se generan en los cúmulos; más de la mitad cuentan con compañeras binarias. Los planetas pueden aparecer en un plano que difiere del plano de la órbita estelar. En este caso, la gravedad de la estrella compañera distorsiona y realinea las órbitas planetarias, hasta crear un sistema que no es plano, como el solar, sino esférico, parecido al enjambre que revolotea alrededor de la colmena.

Punto final: un restringido grupo de planetas gigantes.

7. Ensamblaje de los plenetas terrestres

Tiempo: de 10 a 100 millones de años

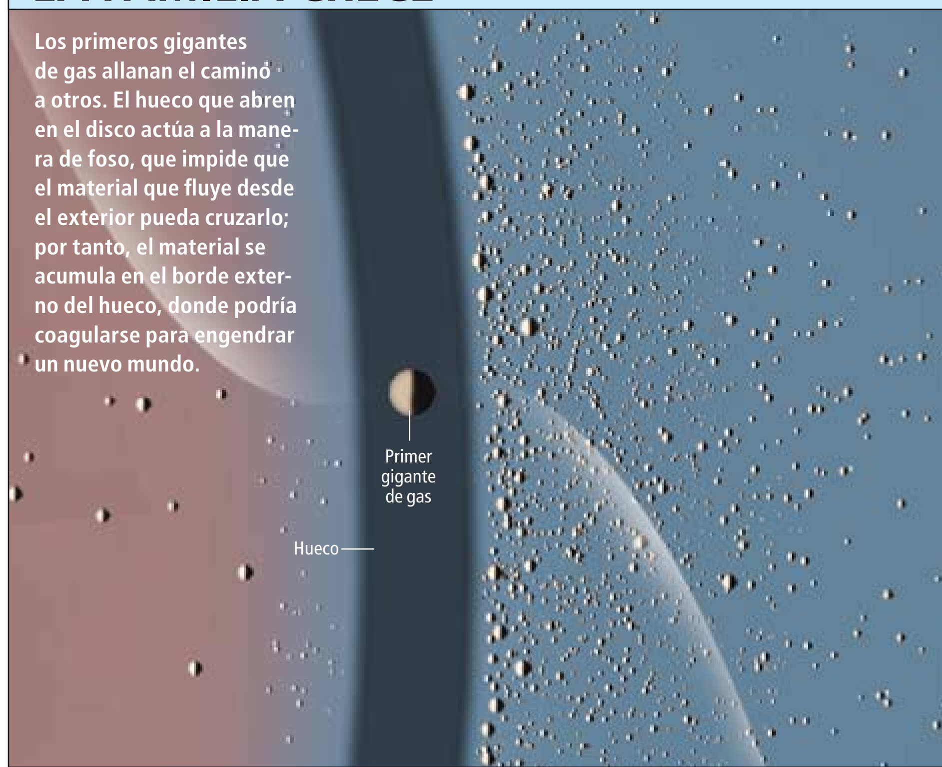
Se sospecha que los planetas semejantes a la Tierra abundan más que los gigantes de gas. Mientras que en la gestación de los gigantes gaseosos interviene un delicado equilibrio de efectos competitivos, la formación de los planetas rocosos parece que debería depender bastante menos de los detalles. Con todo, hasta que no se descubran planetas extrasolares parecidos a la Tierra no tendremos otro ejemplo en que fijarnos que el sistema solar.

Los cuatro planetas terrestres —Mercurio, Venus, la Tierra, y Marte— están hechos sobre todo de sustancias con puntos altos de ebullición: hierro y silicatos. Indica que se formaron más acá de la línea de hielo y se desplazaron poco. A las distancias de estos planetas, dentro del disco de gas, los embriones planetarios debieron de crecer hasta las 0,1 masas terrestres, no mucho más que Mercurio. Para que siguiesen creciendo, las órbitas de los embriones tuvieron que cruzarse de modo que chocaran entre ellos y se fusionasen. El fenómeno admite una explicación sencilla. Tras la evaporación del gas, los embriones se desestabilizarían unos a otros; al cabo de unos pocos millones de años adquirieron órbitas elípticas que se intersecaban.

Más cuesta explicar el proceso que estabilizó de nuevo el sistema e hizo que los planetas terrestres se situasen en sus posiciones actuales, con órbitas casi circulares. Una presencia de gas residual lo justificaría; ahora bien, si hubiera habido gas, habría impedido, para empezar, la inestabilidad del sistema. Cabe la posibilidad de que, tras la formación de los planetas, quedase aún un remanente considerable de planetesimales. A lo largo de los siguientes cien millones de años, los planetas habrían barrido algunos de estos planetesimales; a los demás los habrían desviado hacia el Sol. Los planetas habrían transferido su movimiento aleatorio a los planetesimales de sus alrededores y así habrían acabado en órbitas circulares o casi circulares.

Cabe, asimismo, que el largo alcance de la gravedad de Júpiter hiciera migrar a los planetas terrestres emergentes hacia regiones

LA FAMILIA CRECE



Los primeros gigantes de gas allanan el camino a otros. El hueco que abren en el disco actúa a la manera de foso, que impide que el material que fluye desde el exterior pueda cruzarlo; por tanto, el material se acumula en el borde externo del hueco, donde podría coagularse para engendrar un nuevo mundo.

LOS MAYORES Y LOS MENORES

Aquí están las plusmarcas de los sistemas planetarios en marzo de 2008. Las masas de los planetas son aproximadas debido a las incertidumbres de las mediciones.

La estrella más pesada con planeta: HD 13189 (4,5 masas solares)

La estrella más ligera con planeta: GJ 317 (0,24 masas solares)

La órbita más corta: OGLE-TR-56b (0,0225 UA)

La órbita más grande: PSR B 1620-26b (23 UA)

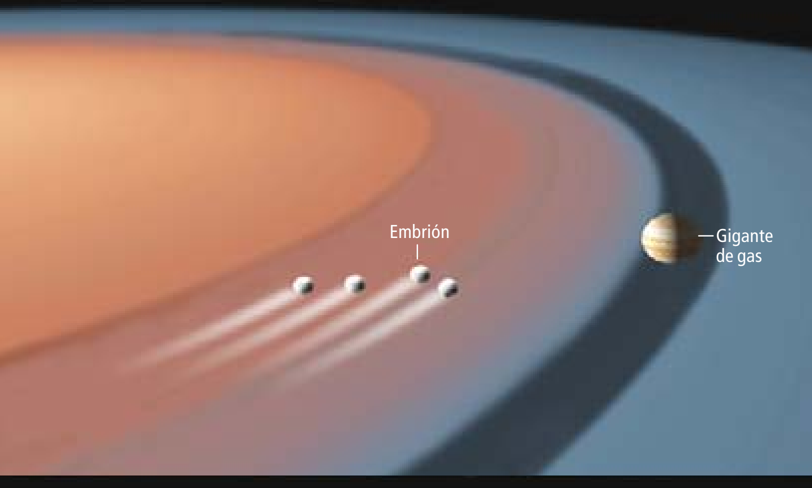
El planeta más pesado: NGC 4349 No 127b (19,8 masas de Júpiter)

El planeta más ligero: PSR 1257+12b (0,02 masas terrestres, gira alrededor de un púlsar)

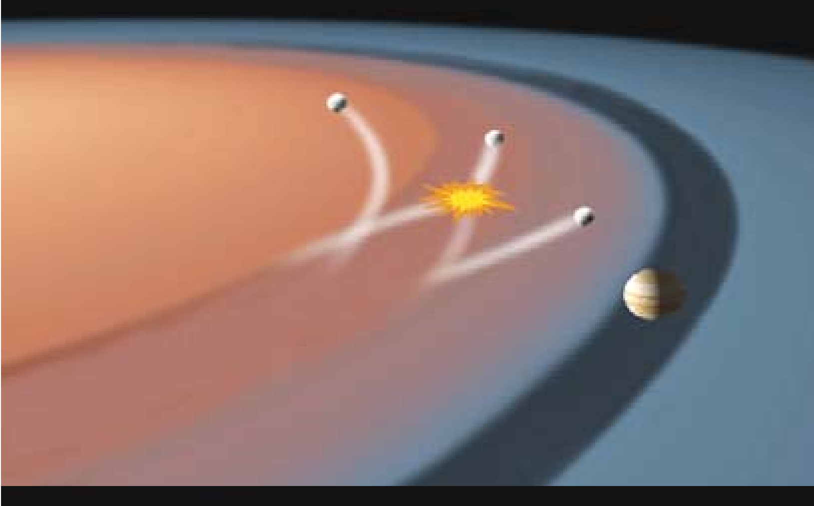


RAZONAMIENTO NO CIRCULAR

En el interior del sistema solar, los embriones planetarios no crecen atrapando gas, sino al chocar entre ellos. Para que así sea, las órbitas han de cruzarse, por lo que algo debe perturbarlos en su movimiento originalmente circular.



Cuando se forman, los embriones tienen órbitas circulares o casi circulares que no se intersecan.



Las interacciones gravitatorias entre los embriones o con el planeta gigante perturban las órbitas.



Los embriones se agrupan en planetas del tamaño de la Tierra. El planeta regresa a una órbita circular al atrapar gas remanente y dispersar planetesimales residuales.

donde se toparon con nuevo material. Tamaña influencia joviana habría sido mayor en ciertas posiciones resonantes, que se habrían desplazado cada vez más hacia el interior conforme la órbita de Júpiter fuese adoptando su configuración final. La datación radiométrica de los asteroides denuncia una génesis temprana (cuatro millones de años después que el Sol). Luego vino la formación de Marte (10 millones de años después) y la de la Tierra (50 millones de años después), como si una ola creada por Júpiter hubiera ido barriendo el sistema solar.

Si no hubiese topado con ninguna restricción, la influencia joviana habría empujado todos los planetas terrestres hacia la órbita de Mercurio. ¿Cómo evitaron un desenlace tan infeliz? Quizá crecieron demasiado para que Júpiter pudiera moverlos, quizá colisiones gigantescas los sacaron fuera de su alcance.

Dicho esto, la mayoría de los científicos planetarios no piensa que el papel de Júpiter fuera decisivo en la génesis de los planetas rocosos. La mayoría de las estrellas de tipo solar carecen de planetas como Júpiter, pese a lo cual cuentan con disco de escombros, indicio de la presencia de planetesimales y de embriones planetarios que podrían haber ensamblado mundos como la Tierra. Una de las cuestiones más importantes que deberán determinarse en los próximos diez años será la razón de que muchos sistemas contengan tierras y no jupíteres.

Por lo que se refiere a nuestro planeta, hubo un momento crítico, entre 30 y 100 millones de años después de la formación del Sol. Sucedió que un embrión del tamaño de Marte colisionó con la prototierra y arrojó al espacio grandes cantidades de materia que, al coagularse, crearon la Luna. Un impacto de semejantes características no sorprende en un sistema solar joven, repleto de materiales en movimiento: las tierras de otros sistemas podrían también tener lunas. Los impactos gigantes comportan la expulsión de cualquier tenue atmósfera primitiva. La atmósfera actual de la Tierra procede, sobre todo, del gas atrapado en los planetesimales que la formaron y que más tarde se emitió a través de los volcanes. **Punto final: planetas terrestres.**

8. Comienzan las operaciones de limpieza

Tiempo: de 50 a 1000 millones de años

Llegados a este punto, el sistema planetario ha culminado su camino. Unos pocos sucesos realizan algunos ajustes finos: la desintegración del cúmulo de estrellas, que puede desestabilizar por medio de la gravedad las órbitas de los planetas; las inestabilidades internas



METEORITOS

Emisarios del pasado

Los meteoritos no son tanto meras rocas espaciales cuanto fósiles, el único registro tangible del origen del sistema solar con el que se cuenta. Se cree que proceden de los asteroides, fragmentos a su vez de planetesimales que nunca se convirtieron en planetas y han permanecido en congelación profunda desde entonces. La composición de los meteoritos refleja lo que les pasó a sus progenitores. Llevan inscritas las cicatrices que les dejó la gravedad del joven Júpiter.

Es evidente que los meteoritos de hierro y rocas se originaron en planetesimales cuyo material estuvo fundido, puesto que alojan el hierro y los silicatos segregados: el hierro pesado en el núcleo y los silicatos más ligeros en las capas exteriores. Se piensa que el calentamiento lo generó el isótopo radiactivo aluminio 26, con una vida media de 700.000 años. Es posible que una explosión de supernova o una estrella cercana proporcionaran el suministro necesario de este isótopo. En tal caso, la primera generación de planetesimales de nuestro sistema solar debió de contenerlo en cantidad abundante.

Pero escasean los meteoritos de hierro y rocas. La mayoría de los meteoritos contienen cóndrulos, concreciones de tamaño milimétrico que preceden a la formación de los planetesimales y no pueden sobrevivir a la fusión. Por tanto, parece que la mayoría de los asteroides no proceden de los restos de la primera generación de planetesimales. Es posible que esa generación haya sido dispersada, presumiblemente por Júpiter. Se calcula que la región hoy día ocupada por el cinturón principal de asteroides contenía mil veces más material que ahora. Los pocos granos que eludieron el empuje de Júpiter, o los que pasaron a la región del cinturón, se agruparon en nuevos planetesimales. Mas, para entonces, ya quedaba poco aluminio 26 radiactivo, por lo que estos nuevos cuerpos no se fundieron. La composición isotópica de los cóndrulos de los meteoritos sitúa su creación unos dos millones de años después del comienzo de la formación del sistema solar.

La textura cristalina de los cóndrulos da a entender que antes de que se incorporaran a los planetesimales se calentaron bruscamente, se convirtieron en rocas fundidas y se enfriaron. Las ondas generadas por la migración orbital temprana de Júpiter ocasionarían frentes de choque que producirían estas ráfagas de calor.

que se crean cuando la estrella elimina lo que queda de gas en el disco; y la continua dispersión de los planetesimales restantes por parte de los planetas gigantes. En nuestro sistema solar, Urano y Neptuno expulsaron a los planetesimales hacia el cinturón de Kuiper o hacia el Sol. Júpiter, con mayor gravedad, los envió hacia la nube de Oort, en los confines del dominio gravitatorio del Sol. La nube de Oort podría contener una masa equivalente a 100 veces la Tierra. De vez en cuando, un planetesimal del cinturón de Kuiper o de la nube de Oort cae hacia el Sol y se convierte en un cometa.

Al dispersar a los planetesimales, los planetas mismos migran un poco, lo que podría explicar la sincronización de las órbitas de Neptuno y Plutón [*véase* "Migración planetaria", por Renu Malhotra; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre de 1999]. Saturno, por ejemplo, pudo haber estado más cerca de Júpiter, para después alejarse. Este proceso podría explicar el "bombardeo pesado tardío", un período especialmente intenso de impactos sobre la Luna (y presumiblemente sobre la Tierra) acontecido unos 800 millones de años después de la formación del Sol. A veces se producirán colisiones titánicas entre planetas plenamente desarrollados, muy avanzado ya el desarrollo de su sistema.

Punto final: la configuración definitiva de planetas y cometas.

JIM STROPE (*meteorito*); NASA/JPL (*anillo*)

Ningún plan rígido

Antes de la era de los descubrimientos de los planetas extrasolares, sólo estudiábamos nuestro sistema solar. Aunque nos ha proporcionado una cantidad ingente de información sobre la microfísica de la formación planetaria, ha restringido nuestro conocimiento de los mecanismos de desarrollo de otros sistemas planetarios. La sorprendente diversidad planetaria descubierta en el curso de los últimos diez años ha expandido nuestros horizontes teóricos. Ahora sabemos que los planetas extrasolares son los supervivientes de la secuencia compuesta por la formación protoplanetaria, la migración, la ruptura y la continua evolución dinámica. El relativo orden de nuestro sistema solar no responde a ningún plan.

Los teóricos ya no quieren idear cuadros explicativos de las reliquias que la formación del sistema solar ha dejado tras de sí. Hoy persiguen la formulación de teorías con capacidad predictiva que puedan ser probadas por futuras observaciones. Hasta ahora, los datos sólo han descubierto planetas con la masa de Júpiter alrededor de estrellas de tipo solar. Una nueva generación de detectores y de instrumentos permitirá buscar planetas del tamaño de la Tierra. Según la hipótesis de la acreción secuencial, son muy comunes. Quizá sólo hayamos empezado a vislumbrar la gran diversidad de los mundos.

Bibliografía complementaria

TOWARDS A DETERMINISTIC MODEL OF PLANETARY FORMATION. S. Ida y D. N. C. Lin en *Astrophysical Journal*, vol. 604, n.º 1, págs. 388-413; marzo 2004.

PLANET FORMATION, THEORY, OBSERVATION, AND EXPERIMENTS. Dirigido por Hubert Klahr y Wolfgang Brandner. Cambridge University Press, 2006.

Ciertos interruptores inscritos en el ADN determinan cuándo y dónde se activan los genes. Gracias a ellos, los genomas producen una amplia diversidad de formas animales a partir de dotaciones génicas muy parecidas

A primera vista parece la lista de animales de un zoo: un elefante, un armadillo, una zarigüeya, un delfín, un perezoso, un erizo, murciélagos grandes y pequeños, un par de musarañas, algunos peces, un macaco, un orangután, un chimpancé, un gorila y otras criaturas menos conocidas. Pero este elenco de animales salvajes no tiene nada que ver con parque zoológico real alguno. No hay jaulas, ni bares, ni siquiera animales. Es un zoo "virtual", que sólo alberga las secuencias del ADN de esos animales, vale decir, los cientos o miles de millones de letras de código del ADN que constituyen el listado genético de cada especie.

Los visitantes más entusiastas de este nuevo zoo molecular son los biólogos porque en él pueden encontrar un inmenso y detallado registro de la evolución. Llevan decenios queriendo averiguar cómo ha surgido la enorme diversidad de especies. Desde hace medio siglo sabemos que los cambios en los rasgos físicos, desde el color del cuerpo hasta el tamaño del cerebro, se deben a cambios en el ADN. Sin embargo, determinar con precisión qué cambios dentro de la notable extensión de las secuencias del ADN son los que confieren a los animales su aspecto característico era, hasta hace poco, inalcanzable.

Hoy en día se está descifrando la información registrada en el ADN para localizar las instrucciones por las que las especies de moscas, peces o pájaros difieren unas de otras, o por las que nosotros mismos somos distintos de los chimpancés. Esta búsqueda ha provocado un cambio sustancial en nuestro punto de vista. Durante la mayor parte de los últimos 40 años, más o menos, se había polarizado la atención en los genes (las secuencias de nucleótidos del ADN que codifican las cadenas de aminoácidos que forman las proteínas).


TOM DRAPER DESIGN; M. JOHNSON *Wellcome Images* (*célula*); NICK PARFITT *Getty Images* (*cebra*); DON FARRALL *Getty Images* (*pez*); DARLYNE A. MURAWSKI *National Geographic/Getty Images* (*mosca*); DARRIN KLIMEK *Getty Images* (*rana*); MATTHEW WARD *Getty Images* (*tigre*); DAVE KING *Getty Images* (*elefante*); GEOFF DANN *Getty Images* (*chimpancé*); JOSE LUIS PELAEZ (*humano*)

La regulación de la evolución

Sean B. Carroll, Benjamin Prud'homme y Nicolas Gompel

Para nuestra sorpresa, resulta que las diferencias en el aspecto son engañosas: animales muy distintos tienen dotaciones génicas muy parecidas. Siguiendo el rastro de la evolución, se están encontrando en el ADN dispositivos ("interruptores genéticos") que no codifican ninguna proteína pero sí regulan *cuándo* y *dónde* se utilizan los genes. Los cambios operados en estos interruptores resultan cruciales para la evolución de la anatomía y proporcionan nuevas pistas sobre la evolución de las infinitas formas del reino animal.

Genes anatómicos y la paradoja del código

Durante mucho tiempo se estuvo creyendo que las diferencias anatómicas entre los animales se reflejaban en nítidas diferencias en los contenidos de sus genomas. Sin embargo, cuando comparamos los genomas de mamíferos muy diferentes, del ratón, la rata, el perro, el ser humano y el chimpancé, observamos que sus respectivos catálogos de genes se parecen mucho. El número aproximado de genes en el genoma de cada animal (alrededor de 20.000) y las posiciones relativas de muchos de ellos se han conservado bastante bien durante más de cien millones de años de evolución. Eso no quiere decir que no existan diferencias en el número de genes y en su ubicación. Pero, a primera vista, no hay nada en esos catálogos de genes que diga que corresponden a un ratón, a un perro o a una persona. Por ejemplo, la comparación de los genomas del ratón y del ser humano les encuentra un homólogo murino a un 99 por ciento de nuestros genes, por lo menos.

En otras palabras, los seres humanos no tenemos, pese a lo que alguna vez se supuso, más genes que un chinche, una vaca o un pez globo.

Cuando se observa con detalle un gen concreto, el parecido entre las especies constituye también la norma. Por lo general, las secuencias de ADN de dos versiones cualesquiera de un gen, así como de las proteínas que codifican, se parecen; que el grado de semejanza sea mayor o menor sólo refleja el período de tiempo que ha transcurrido desde que las dos especies se diversificaron a partir de un ancestro común. Tamaña conservación de las secuencias codificadoras durante el período evolutivo produce desconcierto; aún más, cuando se trata de los genes implicados en la construcción y el diseño del cuerpo.

Sólo una pequeña fracción de los genes (menos del 10 por ciento) participa en la construcción y el diseño del cuerpo de los animales durante su desarrollo, desde su fase de huevo fecundado hasta el estado adulto. El resto interviene en las tareas celulares de los diversos órganos y tejidos. En las diferencias anatómicas entre animales (en el número, tamaño, forma o color de las partes del cuerpo) algo han de tener que ver los genes responsables de la construcción del cuerpo. El estudio del papel crucial que durante la evolución han desempeñado los genes y procesos asociados con el desarrollo anatómico se ha ganado su propio nombre: evo-devo (de *evolutionary developmental biology*, biología evolutiva del desarrollo).

A los especialistas en esa área de investigación nos intriga el descubrimiento de que las proteínas utilizadas para construir el cuerpo se

CONCEPTOS BASICOS

- Como los genes codifican las instrucciones para construir los cuerpos de los animales, hubo un tiempo en que se esperaba encontrar diferencias genéticas interespecíficas que reflejasen su diversidad morfológica. Sin embargo, animales muy distintos contienen genes muy parecidos.
- Las mutaciones en los "interruptores" del ADN que controlan a los genes que dan forma al organismo, ha constituido una importante fuente de diferencias evolutivas entre los animales, mayor incluso que las mutaciones génicas.
- Si queremos comprender por qué difieren unos animales de otros, incluidos nosotros mismos, tendremos que buscar más allá de los genes.

DON FARRALL *Getty Images*

parecen entre sí, por término medio, todavía más que el resto de las proteínas. Parece una paradoja: animales tan distintos como un ratón y un elefante se forman a partir de un conjunto muy parecido de proteínas, que intervienen en la formación del cuerpo y cuyas funciones son iguales. Lo mismo se puede decir de los seres humanos y de nuestros parientes vivos más cercanos: la mayoría de nuestras proteínas difieren de las de un chimpancé en apenas uno o dos de los varios cientos de aminoácidos que contiene cada proteína; el 29 por ciento posee exactamente la misma secuencia.

¿Cómo explicamos esa disparidad entre la evolución en el nivel de las proteínas y la evolución en el de la anatomía? En alguna parte de todo ese ADN genómico tiene que haber diferencias significativas que sí han evolucionado. El quid está en descubrirlas. Y para descubrirlas importa acertar dónde se mira. Unos lugares mucho más difíciles de acotar que los propios genes.

Interruptores genéticos

En los seres humanos, los segmentos del ADN que codifican proteínas constituyen alrededor del 1,5 por ciento de nuestro genoma. Los genes son, en realidad, pequeñas islas de información en un vasto océano de secuencias de ADN. Que sepamos, la mayor parte del ADN no codificador restante no hace nada, salvo algunas secuencias, que intervienen en la regulación de la expresión génica. Las secuencias reguladoras son cruciales para la evolución.

La expresión de un gen consta de la transcripción de la secuencia de ADN en una versión de ARN mensajero (ARNm) y de la traducción de ese ARNm a una secuencia proteica. La expresión de la mayoría de los genes se regula en la transcripción. Las células no desperdician energía fabricando ARNm y proteínas que no necesitan.

Muchos genes se expresan sólo de maneras que son específicas del órgano, tejido o tipo de célula en que se encuentren. Determinadas secuencias no codificadoras del ADN, los "intensificadores", desempeñan un papel fundamental a la hora de decidir cuándo y dónde se produce la expresión. Los intensificadores son uno de los componentes de los "interruptores genéticos" que activan o desactivan genes en el momento y lugar preciso del organismo. El otro componente es un tipo de proteínas, los "factores de transcripción", que se unen a determinadas secuencias del ADN. Dentro de un núcleo celular, la unión de los factores de transcripción al intensificador establece si el interruptor (y, por tanto, el gen) se halla activado o no en la célula correspondiente.

Cada gen tiene al menos un intensificador. A diferencia de los propios genes, cuyas regiones codificadoras se identifican fácilmente gracias a la gramática bastante simple del código genético, no se reconoce a los intensificadores por sus secuencias de ADN; hay que descubrirlos experimentalmente. Por regla general, los intensificadores adquieren una longitud de algunos cientos de pares de bases y se encuentran a cualquier lado de un gen, o incluso dentro de una región no codificadora de su interior. También pueden hallarse a una distancia de miles de nucleótidos del gen.

Con respecto a lo que nos ocupa, lo importante es que algunos genes poseen muchos intensificadores distintos. Eso resulta particularmente cierto en el caso de los genes que codifican las proteínas que moldean las formas anatómicas. Cada intensificador regula de manera independiente la expresión del gen en distintas partes del organismo y en distintas etapas del ciclo vital del animal, de suerte que la expresión completa de un gen es un mosaico de múltiples lugares de expresión, controlados de forma independiente. Los intensificadores posibilitan que un mismo gen opere muchas veces en contextos distintos; potencian, pues, la versatilidad funcional de cada gen.

Un gen implicado en la coloración de ciertas partes del cuerpo de la mosca de la fruta pone de manifiesto la lógica modular de este sistema de regulación génica. El gen *Yellow* codifica una proteína que promueve la formación de una pigmentación de color negro: las moscas mutantes que carecen de esta proteína son amarillas. El gen *Yellow* posee distintos intensificadores que lo activan durante el desarrollo de diversas partes del cuerpo de la mosca, alas y el abdomen incluidos.

Como el gen *Yellow* interviene en el desarrollo de tantos tejidos, las mutaciones en el propio gen resultarían desastrosas si alterasen o anulasen la función de la proteína; afectarían a la función de la proteína de pigmentación Yellow en todo el organismo. Por el contrario, los cambios limitados a uno de los intensificadores del gen afectarían sólo a la función de ese intensificador y a la expresión del gen *Yellow* que controlase, sin provocar cambios en la expresión y función de la proteína en otros tejidos.

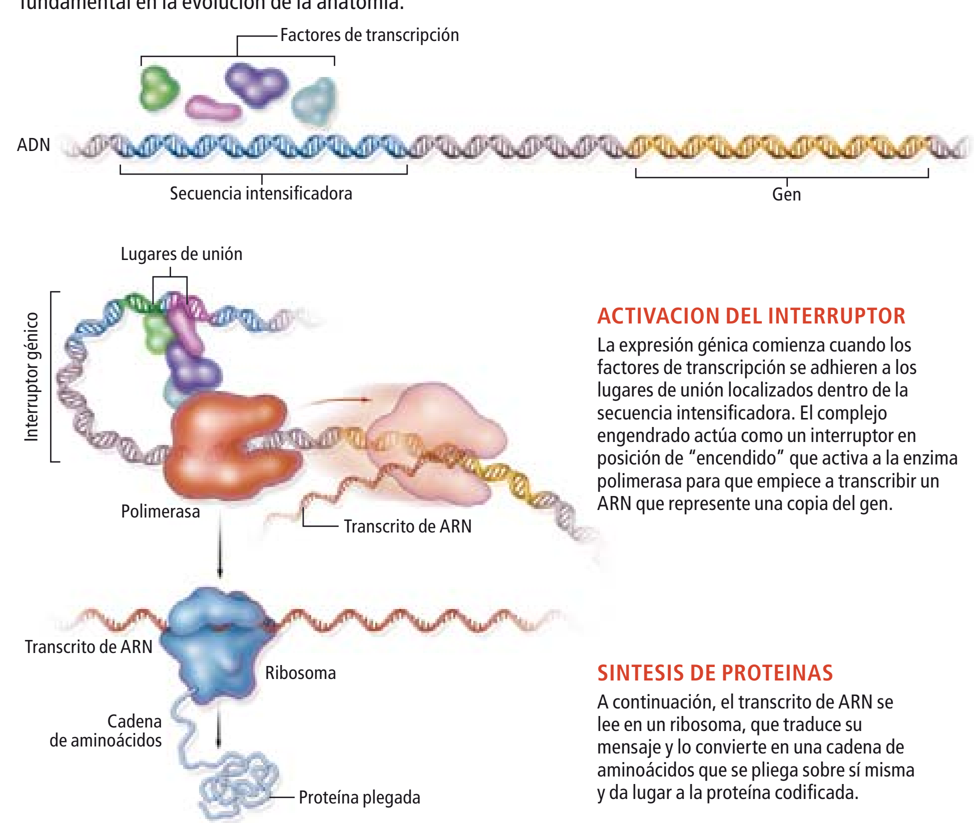
Las repercusiones evolutivas de la regulación modular de los genes implicados en el diseño del cuerpo son profundas. En teoría, las mutaciones de los intensificadores permitirían que determinados rasgos del organismo se modificasen de forma selectiva, sin que cambiasen los genes o proteínas. Y en los últimos años han aparecido pruebas directas de que tal ha



A la doctrina concerniente al papel fundamental que, durante la evolución, han desempeñado los genes y procesos asociados al desarrollo anatómico se la denomina "evo-devo."

INTERRUPTORES GENETICOS EN ACCION

Los intensificadores, segmentos del ADN que se encuentran, con frecuencia, en las proximidades de los genes, son componentes fundamentales de los interruptores que controlan la "expresión" génica: la síntesis, por parte de la célula, de la proteína codificada por un gen. Se está viendo que desempeñan un papel fundamental en la evolución de la anatomía.



ACTIVACION DEL INTERRUPTOR

La expresión génica comienza cuando los factores de transcripción se adhieren a los lugares de unión localizados dentro de la secuencia intensificadora. El complejo engendrado actúa como un interruptor en posición de "encendido" que activa a la enzima polimerasa para que empiece a transcribir un ARN que represente una copia del gen.

SINTESIS DE PROTEINAS

A continuación, el transcrito de ARN se lee en un ribosoma, que traduce su mensaje y lo convierte en una cadena de aminoácidos que se pliega sobre sí misma y da lugar a la proteína codificada.

sido a menudo la evolución de las diversas partes o diseños del organismo.

Evolución de los interruptores

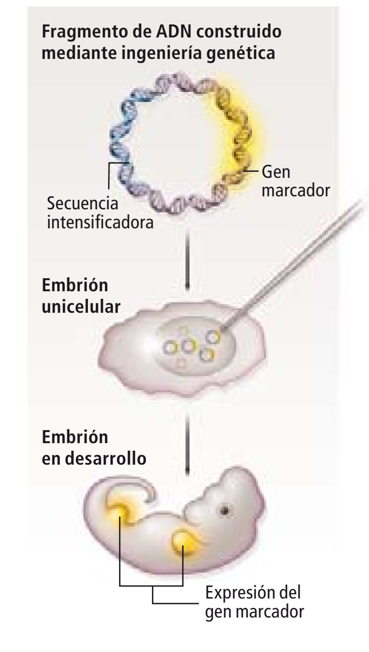
Una de las estrategias principales en biología consiste en identificar los modelos experimentales más sencillos del fenómeno que uno desea estudiar. En lo que respecta a la evolución del diseño corporal, la coloración cumple este requisito. Se trata de uno de los rasgos más conspicuos de los animales y desempeña un papel fundamental en sus interacciones con el entorno y entre sí. Los patrones de coloración del cuerpo de las moscas de la fruta se han diversificado con celeridad entre especies estrechamente emparentadas. El análisis del mecanismo de adquisición de manchas y bandas coloreadas ilustra cómo y por qué la evolución de los interruptores genéticos determina la evolución de la anatomía.

En algunas especies, los machos presentan manchas de intenso color negro en los bordes de las alas, mientras que otras especies carecen de esas manchas. En algunas de esas especies, el abdomen de los machos es muy oscuro, lo que le ha valido a la más famosa de las moscas de la fruta su nombre, *Drosophila melanogaster* (*melanogaster* significa "vientre negro"); los machos de otras carecen de esa banda negra. En las especies de alas manchadas, el macho enseña sus manchas a la hembra durante la danza del cortejo. Hemos descubierto que, en las especies con manchas, las células que formarán éstas producen cantidades muy elevadas de la proteína Yellow, mientras que en el resto de las células de las alas se sintetiza en cantidades reducidas. En las especies sin manchas se producen pequeñas cantidades de Yellow por toda el ala, de manera que el pigmento negro sólo da lugar a un tenue sombreado.

Para saber por qué se produce Yellow en las manchas de las alas de unas especies y no en otras, buscamos, en las secuencias de ADN próximas al gen *Yellow*, intensificadores que controlasen su expresión en diversas partes del organismo. En las especies sin manchas, hay un intensificador que determina que *Yellow* se exprese en el ala de una manera mortecina y uniforme. Esta actividad da lugar al color gris claro de las alas de la mosca. Cuando se analizó el segmento de ADN correspondiente en una especie con manchas, descubrimos que

LOCALIZACION DE INTERRUPTORES

Para saber cuándo y dónde un intensificador regula la expresión de un gen, se crea, por ingeniería genética, un fragmento de ADN que contiene la secuencia intensificadora junto con un gen marcador que producirá una señal visible cuando se active. Una vez inyectada en un embrión unicelular, esta molécula de ADN se integrará en el genoma del animal y estará presente en todas las células del organismo en desarrollo. La activación del gen marcador pone de manifiesto el papel del intensificador en los procesos de construcción del organismo durante el desarrollo.



TAMI TOLPA

MANCHAS Y BANDAS MODULARES

Cuando varios intensificadores controlan la expresión de un gen en distintas partes del organismo, un cambio en uno de los intensificadores puede alterar la actividad del gen en un lugar determinado sin afectarla en otros sitios. *Yellow*, un gen de la mosca de la fruta, produce un pigmento negro durante el desarrollo del cuerpo y las alas de la mosca; sin embargo, durante la evolución varias especies han adoptado patrones de pigmentación distintos mediante cambios en las secuencias de sus intensificadores.

PATRON ANCESTRAL

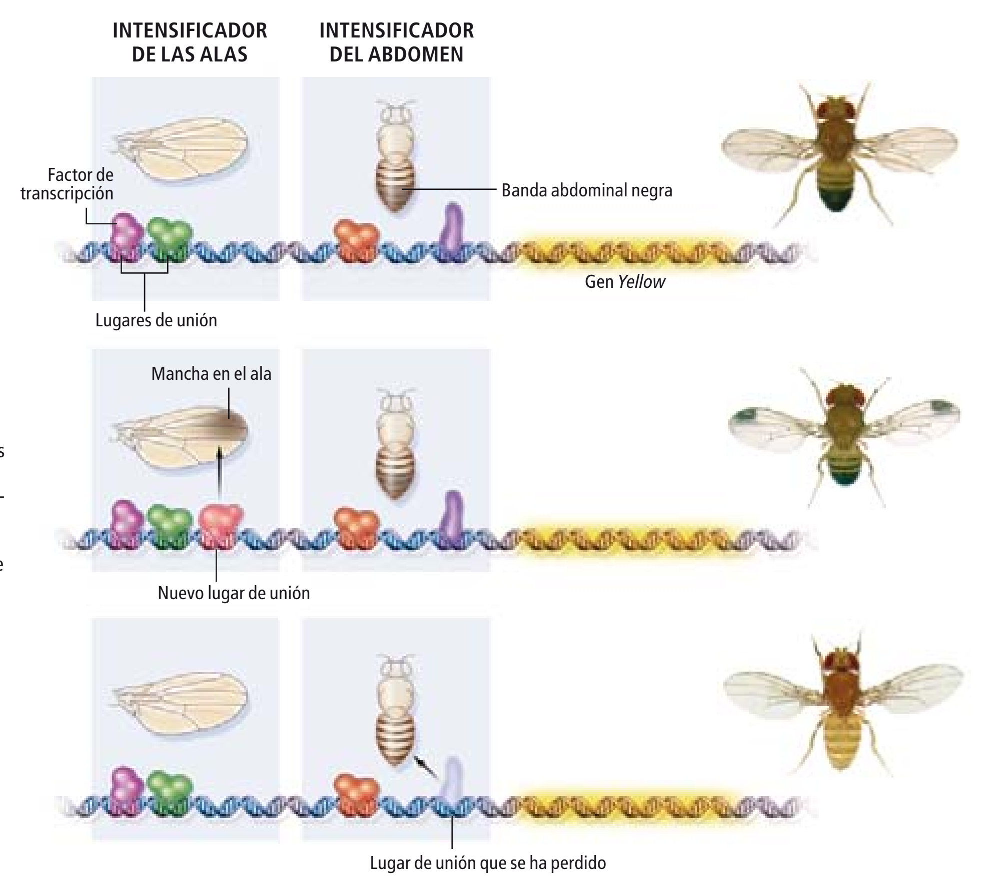
En una especie que representa la versión ancestral de las moscas de la fruta, el intensificador que controla la actividad del gen *Yellow* en las alas mantiene bajo el nivel de expresión génica, con lo que aparece una coloración gris clara, pero en el abdomen un intensificador distinto induce un elevado nivel de expresión génica, que genera una banda de intenso color negro.

ADQUISICION DE UNA CARACTERISTICA

Durante la evolución, algunas especies han desarrollado manchas negras en las alas al adquirir un nuevo lugar para la unión de factores de transcripción en una secuencia intensificadora alar, la cual, durante el desarrollo de las alas, mantiene un elevado nivel de expresión del gen *Yellow* en determinadas células.

PERDIDA DE UNA CARACTERISTICA

Otras especies han perdido la banda abdominal al desaparecer un lugar de unión en la secuencia del intensificador correspondiente.



controla tanto este patrón de niveles reducidos de expresión como el de expresión intensa en las manchas.

Lo que ha ocurrido en el transcurso de la evolución de las especies con manchas es que en la secuencia del ADN del intensificador del gen *Yellow* de las alas surgieron nuevos lugares para la unión de factores de transcripción sintetizados en las alas. Estos cambios crearon un patrón de expresión (manchas en las alas) sin alterar los lugares donde se sintetiza la proteína Yellow, ni su función en otras partes del organismo.

Una historia similar explica la evolución de la banda negra del abdomen, aunque con una diferencia. A pesar de que tendemos a pensar que la presencia de una característica en una especie y su ausencia en otra emparentada con ella indica su adquisición por la primera, no siempre acontece. Antes bien, lo habitual es que la evolución dé marcha atrás y se pierda algún rasgo. La pérdida de características corporales ofrece quizás el ejemplo más claro de que la evolución de los intensificadores es el mecanismo más probable de la evolución anatómica.

Un intensificador del gen *Yellow* controla su expresión en el abdomen. En los machos de las especies con la banda de color negro, este intensificador determina una intensa expresión del gen *Yellow* en las células de la parte posterior del abdomen. Pero en el transcurso de la evolución, algunas especies, como *Drosophila kikkawai*, han perdido esta banda pigmentada. En *D. kikkawai*, el intensificador ya no es capaz de impulsar niveles elevados de expresión del gen *Yellow* en la parte posterior del abdomen porque unas pocas mutaciones han alterado algunos de sus lugares de unión con los factores de transcripción.

Importa destacar que el gen *Yellow* permanece activo en otras partes del cuerpo y que su función bioquímica se conserva intacta. Aunque una de las formas de perder la banda negra podría haber sido a través de mutaciones que inactivasen el gen *Yellow* y su proteína, la

TAMI TOLPA; NICOLAS GOMPEL Y BENJAMIN PRUD'HOMME (*moscas*)

selección natural no ha permitido este mecanismo, porque la pérdida de la función de la proteína Yellow en otras partes del organismo podría acarrear consecuencias perjudiciales.

Una pérdida puede favorecer o no la supervivencia o el éxito reproductivo. Algunas resultarán adaptativas porque facilitarán algún cambio en el estilo de vida. Pensemos en los vertebrados, donde se han perdido muchas veces las extremidades posteriores —serpientes, lagartos, ballenas y manatíes—, pérdidas asociadas a una adaptación a diversos hábitats y medios de locomoción. Los precursores evolutivos de las extremidades traseras de los vertebrados tetrápodos son las aletas ventrales de los peces.

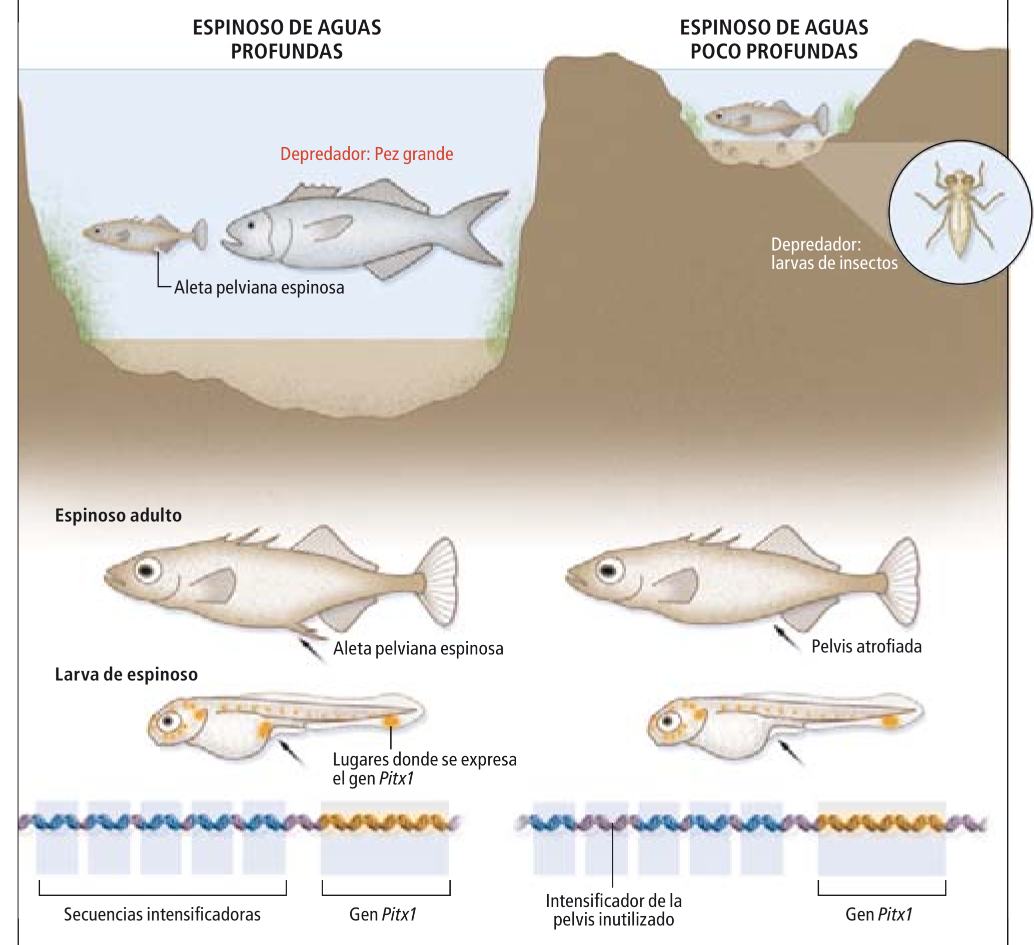
En la evolución de especies de peces estrechamente emparentadas entre sí han surgido espectaculares diferencias en la anatomía de las aletas ventrales. En muchos lagos de Norteamérica, el espinoso (*Gasterosteus aculeatus*, un pez que tiene tres radios espinosos dorsales) adopta dos formas: una versión de aguas abiertas que posee una pelvis con radios espinosos completamente desarrollada y otra versión de aguas poco profundas que vive sobre el fondo y tiene la pelvis y sus radios espinosos atrofiados. En aguas abiertas, esas espinas protegen al pez: evitan que lo engullan los depredadores de mayor tamaño. Pero en el fondo del lago son un estorbo porque las larvas de las libé-



Las mutaciones de las secuencias reguladoras no son la única forma de evolución, pero sí el mecanismo más probable en el caso de un gen que cumpla múltiples funciones y sólo una de ellas resulte modificada.

UNA PERDIDA BENEFICIOSA

El espinoso (*Gasterosteus aculeatus*, un pez que tiene tres radios espinosos dorsales) constituye otro claro ejemplo de adaptación a través de la evolución de una secuencia intensificadora que regula un gen. Dependiendo de dónde viven y, por tanto, de cuál es el depredador que constituye una mayor amenaza, estos peces pueden adoptar dos formas: los espinosos de aguas profundas desarrollan una aleta pelviana espinosa en el abdomen que dificulta que los engulla un pez de mayor tamaño; los espinosos de aguas poco profundas han perdido la aleta pelviana, con lo que resulta más difícil que se les adhieran las larvas de insectos que habitan en el fondo y se alimentan de las crías de los peces.



El gen que regula el desarrollo de la aleta pelviana, denominado *Pitx1*, contribuye al desarrollo de muchas otras estructuras importantes del pez, cada una de las cuales está regulada por un intensificador distinto. En el espinoso de aguas poco profundas (*derecha*), una mutación ha inutilizado el intensificador responsable del desarrollo de la aleta pelviana y ha dejado intactos el gen *Pitx1* y el resto de sus funciones.

TAMI TOLPA

Los autores

Sean B. Carroll, Benjamin Prud'homme y **Nicolas Gompel** colaboran desde hace años en un mismo empeño: descifrar los mecanismos a través de los cuales la evolución de las secuencias reguladoras del ADN determina la forma de los animales. Carroll es investigador del Instituto Médico Howard Hughes y catedrático de biología molecular y genética de la Universidad de Wisconsin en Madison. Prud'homme y Gompel fueron, con anterioridad, becarios posdoctorales en el laboratorio de Carroll y en la actualidad investigan la evolución de la morfología y etología en el Instituto de Biología del Desarrollo, en Marsella-Luminy.

lulas que se nutren de las crías de los peces se pueden adherir a ellas.

La evolución ha dado lugar a las reiteradas diferencias en la morfología pelviana de estos peces en los aproximadamente 10.000 años que han transcurrido desde la última glaciación. Los espinosos oceánicos de largos radios colonizaron muchos lagos distintos y la evolución ha generado formas atrofiadas varias veces, de manera independiente. Merced al estrecho parentesco entre los espinosos y su cruzamiento en el laboratorio, se han podido cartografiar los genes implicados en la reducción de su pelvis.

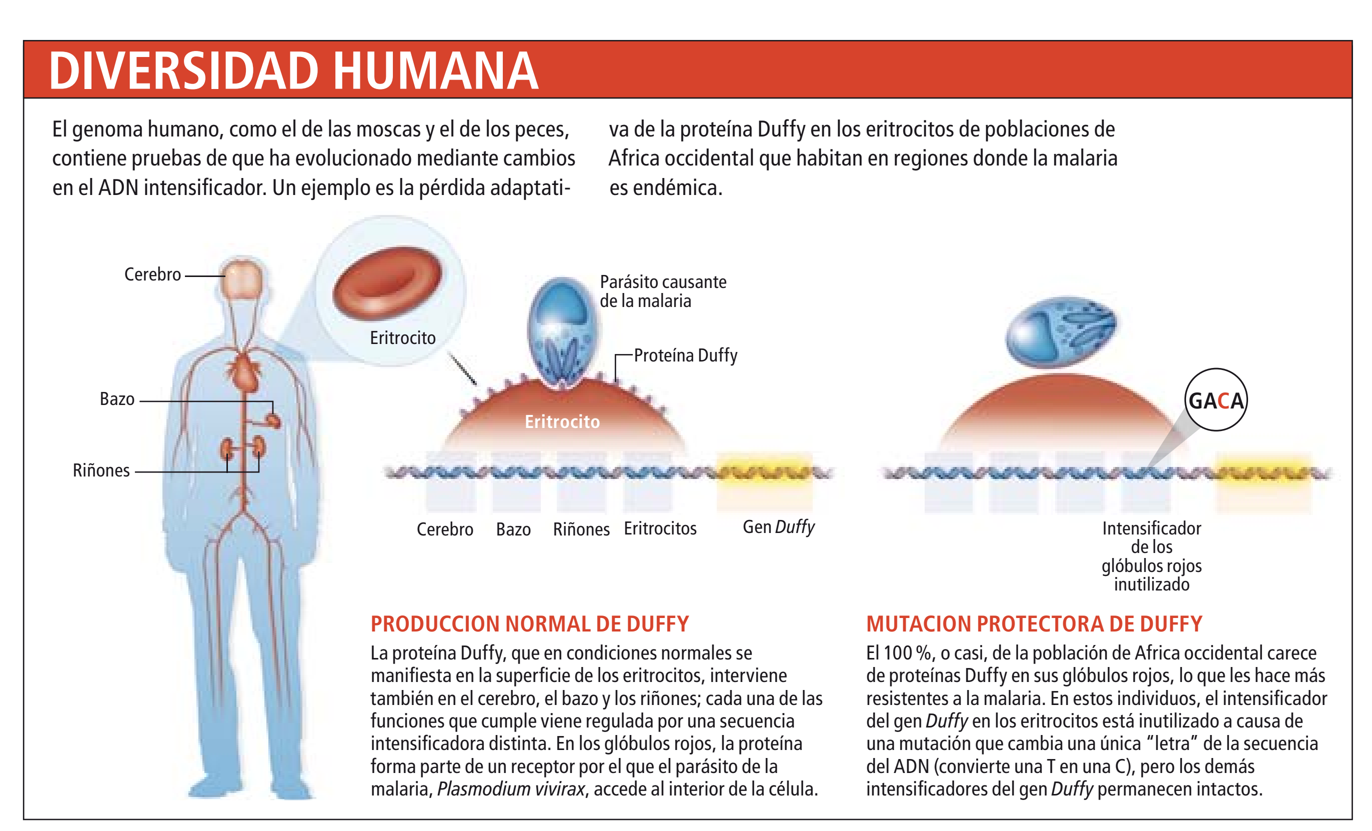
David M. Kingsley, junto con Dolph Schluter y sus colaboradores, han demostrado que los cambios en la expresión de un gen que participa en la formación de la estructura ósea de la pelvis guardan relación con la atrofia pélvica. Como la mayoría de los genes que participan en la construcción del cuerpo, el gen *Pitx1* desempeña funciones múltiples en el desarrollo del pez. Pero su expresión se pierde de manera selectiva en la región del pez que dará lugar a la aleta pelviana y a los radios. De nuevo, la razón estriba en los cambios evolutivos de un intensificador. En las diversas variantes morfológicas del espinoso no se ha producido ningún cambio en la secuencia de la proteína Pitx1.

Yellow, *Pitx1* y la mayoría de los genes responsables de la construcción y diseño corporal son pleiotrópicos, es decir, afectan a la formación o aparición de multitud de rasgos. Las mutaciones en la secuencia codificadora de un gen pleiotrópico dan lugar a multitud de efectos en todos los rasgos controlados por este gen, y no es probable que la selección natural tolere esa gran cantidad de cambios. La lección más importante que nos enseña la evolución de las manchas, bandas y esqueletos es que las mutaciones en las secuencias reguladoras evitan los efectos pleiotrópicos que se derivarían de las mutaciones en las secuencias codificadoras; en cambio, permiten la modificación selectiva de determinadas partes del organismo. Las mutaciones en las secuencias reguladoras no son la única forma de evolución, pero sí el mecanismo más probable cuando interviene un gen que posee múltiples funciones y una de ellas sufre una modificación selectiva.

Genes comunes, variedad infinita

La evolución de los intensificadores no está en absoluto limitada ni a los genes que afectan a la forma del organismo ni a las moscas de la fruta o a peces raros. En el caso de los rasgos humanos también se ha demostrado que, en bastantes casos, cambios evolutivos en las secuencias reguladoras alteran la expresión de los genes.

Uno de los casos más llamativos en la evolución humana reciente concierne a cierta adaptación, mediante la pérdida selectiva de la expresión de un gen, a un ambiente en el que la malaria es endémica. Además de los grupos sanguíneos A, B y 0 con los que estamos fami-



DIVERSIDAD HUMANA

El genoma humano, como el de las moscas y el de los peces, contiene pruebas de que ha evolucionado mediante cambios en el ADN intensificador. Un ejemplo es la pérdida adaptativa de la proteína Duffy en los eritrocitos de poblaciones de Africa occidental que habitan en regiones donde la malaria es endémica.

PRODUCCION NORMAL DE DUFFY

La proteína Duffy, que en condiciones normales se manifiesta en la superficie de los eritrocitos, interviene también en el cerebro, el bazo y los riñones; cada una de las funciones que cumple viene regulada por una secuencia intensificadora distinta. En los glóbulos rojos, la proteína forma parte de un receptor por el que el parásito de la malaria, *Plasmodium vivirax*, accede al interior de la célula.

MUTACION PROTECTORA DE DUFFY

El 100 %, o casi, de la población de Africa occidental carece de proteínas Duffy en sus glóbulos rojos, lo que les hace más resistentes a la malaria. En estos individuos, el intensificador del gen *Duffy* en los eritrocitos está inutilizado a causa de una mutación que cambia una única "letra" de la secuencia del ADN (convierte una T en una C), pero los demás intensificadores del gen *Duffy* permanecen intactos.

TAMI TOLPA

En busca de interruptores

Una de las mayores trabas que limitan el descubrimiento de intensificadores humanos la encarna la dificultad de localizarlos en las vastas regiones no codificadoras del genoma humano. Pero la selección natural tiene un gran poder de conservación. Dar con segmentos de ADN no codificador que se hayan conservado bien durante largos períodos de tiempo evolutivo es una forma de encontrar intensificadores.

En este artículo hemos puesto especial énfasis en los cambios de los intensificadores, porque explican las diferencias entre organismos. Sin embargo, debe entenderse que muchos intensificadores desempeñan funciones que no han cambiado. El ritmo constante de las mutaciones va erosionando el parecido global entre las secuencias de ADN de especies distintas, a medida que van divergiendo; en cambio, la selección natural conservará las secuencias de los intensificadores que mantienen su función; a veces ese grado de conservación es extraordinario.

Unos investigadores del Instituto de Biología Molecular y Celular de Singapur y del Instituto J. Craig Venter en Rockville (Maryland) han descubierto que, a pesar de los más de 500 millones de años de evolución que separan a los tiburones de los humanos, compartimos casi 5000 elementos pertenecientes a regiones no codificadoras situadas cerca de genes y que parecen ser intensificadores. La mayoría de estos elementos tan bien conservados se hallan en las proximidades de genes que participan en la construcción del cuerpo; es un reflejo de que los vertebrados compartan una misma arquitectura global.

Todos los vertebrados presentan características anatómicas (órganos, tejidos, tipos celulares, etc.) que se han conservado durante su diversificación. Si se consideran distancias evolutivas más cortas, aumentan el número de elementos compartidos y el grado de similitud.

Por tanto, gracias a la comparación de genomas el número de intensificadores conocidos en humanos, en mamíferos y en vertebrados crece deprisa y podría conducir a la identificación de las secuencias implicadas en la divergencia de las formas corporales.

liarizados, se han estudiado otros minoritarios. La carencia selectiva de proteína Duffy, que se encuentra en la superficie de los eritrocitos, caracteriza a uno de estos tipos. La proteína Duffy forma parte del receptor utilizado por un parásito que provoca la malaria, *Plasmodium vivax*, para infectar los glóbulos rojos. Ahora bien, los eritrocitos de casi el 100 % de la población de Africa occidental carecen de esta proteína, con lo que los individuos son resistentes a la infección.

El gen *Duffy* se expresa también en otros tejidos del organismo, entre ellos las células del bazo, los riñones y el cerebro. En la población africana, la expresión de *Duffy* en esos otros tejidos se mantiene. Como era de esperar, estos individuos Duffy-negativos son portadores de una mutación en un intensificador del gen *Duffy* que inutiliza el lugar de unión de un factor de transcripción que activa la expresión de *Duffy* en los precursores de los eritrocitos; ese intensificador, en cambio, no tiene ningún efecto en la producción de la proteína Duffy en otras partes del organismo.

Gregory A. Wray, de la Universidad Duke, y sus colaboradores han identificado otros aspectos de la biología que han evolucionado a través de mutaciones en los intensificadores en diversos genes humanos. Una de las asociaciones más fascinantes que se han puesto de manifiesto hasta la fecha se refiere a una divergencia en las secuencias reguladoras que controlan el gen *Prodynorphin*, lo mismo en los grandes simios que en el hombre. El gen en cuestión codifica una serie de pequeñas proteínas opioides producidas en el cerebro y que participan en la percepción, el comportamiento y la memoria. En respuesta a estímulos, el gen humano se expresa de forma más intensa que el gen del chimpancé. Existen sólidas pruebas que sugieren que la secuencia reguladora humana ha evolucionado por selección natural, es decir, se mantuvo porque resultaba ventajosa.

Tal y como ilustran los ejemplos aducidos, es indudable que las mutaciones en las regiones reguladoras del ADN han desempeñado un papel en la evolución humana y que, además, las variaciones en la regulación pueden constituir una fuente rica de diferencias no sólo físicas, sino también en la salud de los individuos. Como no se puede manipular el ADN de los seres humanos como si se tratara del genoma de moscas o peces, cuesta más estudiar los cambios en el ADN regulador a los que se debe nuestra divergencia de otras especies. No obstante, algunos nuevos métodos para el análisis de genomas suponen avances prometedores.

Nos hallamos en las etapas iniciales de la investigación de la evolución de las secuencias del ADN que regulan los genes. En el zoológico virtual de genomas quedan todavía cientos de miles de interruptores genéticos por descubrir o investigar. Sin embargo, ya cabe predecir que los cambios evolutivos de la anatomía, en particular aquellos en los que intervienen genes pleiotrópicos, resultan de cambios en los intensificadores génicos y no en los propios genes.

Se ve así, además, cómo es posible que diversos grupos de animales compartan la mayor parte, si no la totalidad, de los genes implicados en la construcción y diseño corporal: la diversidad del reino animal depende, sobre todo, de cómo y cuándo se utilizan esos genes. Para entender las diferencias morfológicas, no habremos de buscar en genes y proteínas, sino en ámbitos de nuestros genomas por explorar.



Bibliografía complementaria

EVOLUTION AT TWO LEVELS: ON GENES AND FORM. Sean B. Carroll en *PLoS Biology*, vol. 3, págs. 1159-1166; julio de 2005.

ENDLESS FORMS MOST BEAUTIFUL: THE NEW SCIENCE OF EVO DEVO AND THE MAKING OF THE ANIMAL KINGDOM. Sean B. Carroll. W. W. Norton, 2005.

THE MAKING OF THE FITTEST: DNA AND THE ULTIMATE FORENSIC RECORD OF EVOLUTION. Sean B. Carroll. W. W. Norton, 2006.

THE EVOLUTIONARY SIGNIFICANCE OF CIS-REGULATORY MUTATIONS. Gregory A. Wray en *Nature Reviews Genetics*, vol. 8, págs. 206-216; marzo de 2007.

EMERGING PRINCIPLES OF REGULATORY EVOLUTION. Benjamin Prud'homme, Nicolas Gompel y Sean B. Carroll en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 104, suplemento 1, págs. 8605-8612; 15 de mayo de 2007.

LUZ CON MOMENTO ANGULAR ORBITAL

Los fotones tienen un tipo de momento angular capaz de guiar, atrapar y rotar átomos y partículas ultrafríos

Sonja Franke-Arnold y Aidan S. Arnold

CONCEPTOS BASICOS

- La luz puede modificar el movimiento de partículas micrométricas o átomos. Podía hacerlo gracias a su momento lineal y a su momento angular de espín. Hace unos años, se descubrió que la luz podía también tener movimiento angular orbital y que podía transferirlo a las partículas.
- El momento angular de espín de la luz está ligado a su polarización circular. El momento angular orbital deforma los frentes de fase de la luz. Según su magnitud, hace que se retuerzan alrededor del eje de haz de luz con un giro simple, doble, triple, y así sucesivamente.
- El momento lineal de la luz empuja las partículas. El momento angular de espín hace que giren alrededor de su eje. El momento angular orbital les imparte una rotación en torno al eje por el que se propaga la luz.

A temperatura ambiente, los átomos se mueven al azar, con una velocidad media de más de 1600 kilómetros por hora. Para estudiarlos, hay que frenarlos. Condensar nubes de gas llenas de átomos no resuelve el problema: los átomos quedan entonces demasiado empaquetados e interactúan con intensidad tal, que se hace imposible investigar con facilidad sus propiedades individuales. Hay que frenar los átomos, pero manteniendo baja su densidad.

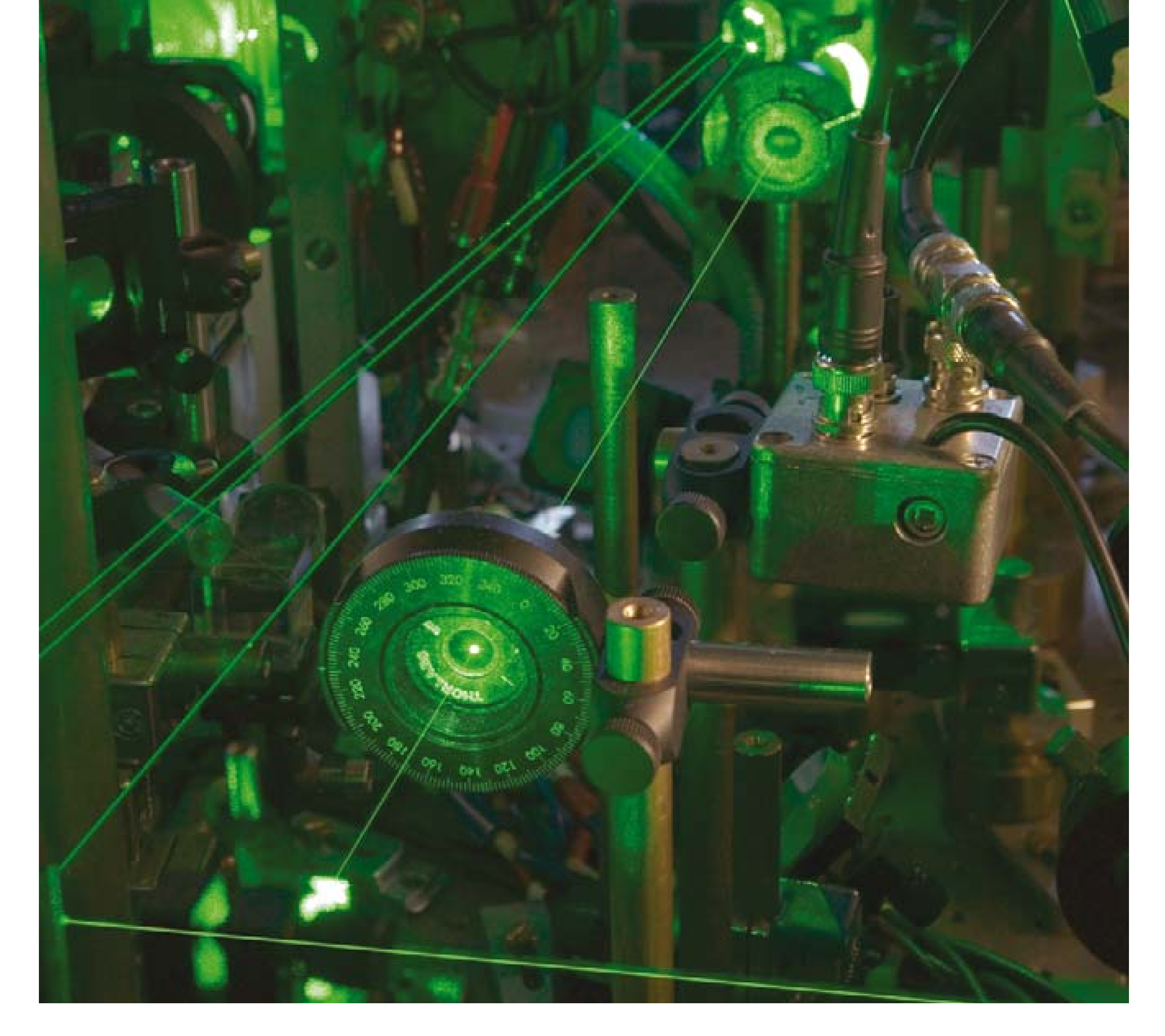
Se puede lograr enfriando los átomos. Los láseres ofrecen una manera eficaz de reducir la temperatura atómica. La luz ejerce fuerzas mecánicas sobre los átomos, en particular de dos maneras: la fuerza de dispersión (o de colisión) y la fuerza dipolar óptica. En 1933 Otto R. Frisch realizó los primeros experimentos relacionados con la fuerza de dispersión. Demostró que la presión de radiación de la luz de una lámpara de sodio desviaba un haz de átomos de sodio. En términos generales, la fuerza de dispersión (y la correspondiente presión de la luz) viene de que los fotones "golpeen" los átomos, con lo que les cambian el momento conforme a un efecto descrito por Einstein en 1917.

Si un átomo absorbe un fotón, adquiere un incremento de velocidad en la dirección del haz láser. Esta interacción a la vez enfría y frena el átomo (conceptos equivalentes en física, ya que ambos involucran una disminución del nivel de energía). Cuando muchos, muchos fotones inciden en un átomo de esa manera, el efecto es significativo. Aunque el momento de cada fotón individual es minúsculo, la rápida y repetida transferencia de pequeñas cantidades de momento puede dar al átomo aceleraciones 10.000 veces más fuertes que la gravedad. Pero el láser debe estar sintonizado a una frecuencia muy específica o, de lo contrario, los fotones pasarán a través de los átomos como si fueran invisibles. La frecuencia necesaria depende también del tipo de átomo y de la rapidez con que se mueva.

La fuerza de dispersión no es quirúrgicamente precisa, ya que cada fotón absorbido vuelve luego a reemitirse por el átomo en una dirección al azar. La fuerza media, por lo tanto, actúa en la dirección del haz de luz, frenando (o enfriando) los átomos que se mueven hacia el haz láser; sin embargo, siempre está acompañada de una fuerza aleatoria (browniana) que calienta los átomos. El calentamiento browniano establece un límite fundamental por debajo del cual los átomos no se pueden enfriar por medio de la fuerza de dispersión.

Para crear átomos ultrafríos deben aplicarse otras técnicas, como el enfriamiento por evaporación. Se basa, en esencia, en el mismo principio que soplar para enfriar el café: eliminar los átomos más calientes, para que la energía media (y, por tanto, la temperatura) del resto de los átomos (o del café) baje. Si los átomos chocan en una medida suficiente para redistribuir su energía, se crean más átomos "calientes" y el proceso puede iterarse.

Una fuerza de la luz diferente, que no calienta los átomos, es la fuerza dipolar óptica. Guarda relación con el índice de refracción del átomo. Si la frecuencia de la luz es ligeramente inferior a la resonancia atómica (la frecuencia de máxima absorción), se podrá atraer átomos a las regiones brillantes de un patrón luminoso. La luz se dice que está "desintonizada al rojo" porque, desplazándose hacia el



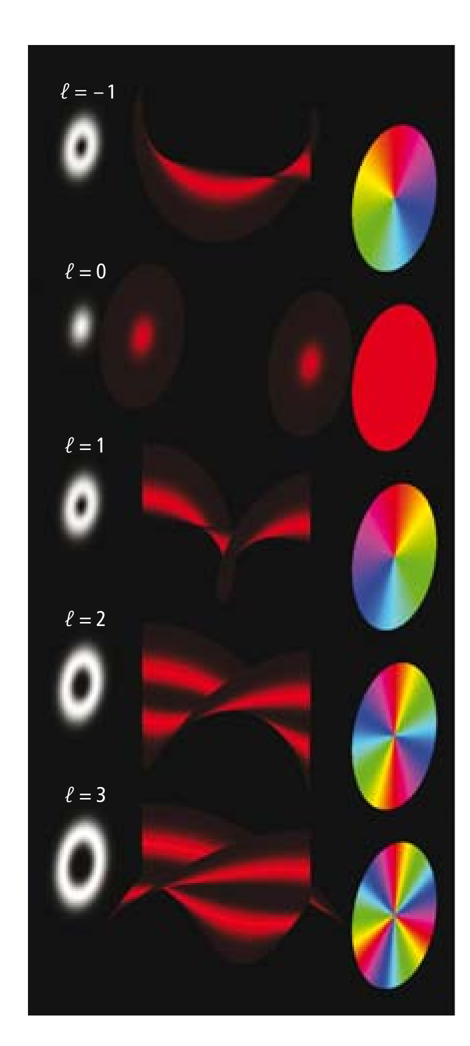
PASCAL GOETGHELUCK/Photo Researchers, Inc./American Scientist

1. EL INTENSO HAZ DE UN LASER no evoca la idea de un enfriamiento extremo. Sin embargo, los láseres se utilizan ahora para enfriar átomos a temperaturas muy cercanas al cero absoluto. Con láseres y campos magnéticos dispuestos de manera precisa se atrapan y retienen átomos ultrafríos. Este montaje de laboratorio se utiliza para crear "condensados de Bose-Einstein", un tipo de materia en la que los átomos se han enfriado hasta que todos se encuentran en el mismo estado cuántico de energía, por lo que son indistinguibles unos de otros y actúan como una masa coherente. Con la ayuda de un dispositivo similar se proponen los autores usar patrones de interferencia para crear nodos luminosos y oscuros, a fin de mantener átomos en trampas que giran como microscópicas ruedas de noria.

extremo rojo del espectro de la luz visible, disminuye la frecuencia. Por el contrario, aumentando la frecuencia (o desintonizando al azul) por encima de la resonancia se hace que los átomos sean repelidos por la luz y busquen la oscuridad. Almacenar átomos en las regiones oscuras de la luz desintonizada al azul ayuda a minimizar el calentamiento causado por el choque de fotones. En general, la fuerza dipolar óptica dominará a la fuerza de dispersión, si la luz se halla lejos de la resonancia y tiene una alta intensidad.

Mediante láseres y campos magnéticos dispuestos de maneras muy precisas se han enfriado átomos a temperaturas de unas pocas millonésimas de grado por encima del cero absoluto; los átomos se mueven en ellas a velocidades manejables, de menos de un kilómetro por hora. La configuración de láseres y campos magnéticos puede también mantener los átomos confinados en un espacio durante varios segundos. La fuerza de enfriamiento de estas trampas atómicas ha sido apodada "melaza óptica", porque los átomos parecen moverse en ellas como si estuviesen inmersos en un fluido viscoso. El trabajo en esta área, en marcha desde los años setenta del pasado siglo, les valió el premio Nobel de 1997 a Steven Chu, de la Universidad de Stanford, Claude Cohen-Tannoudji, del Colegio de Francia en París, y William D. Phillips, del Instituto Nacional de Pesos y Medidas en Maryland. Hoy es corriente en física detener átomos.

No sólo se estudian los átomos superfríos, con ese preciso control de su velocidad, por sus propiedades intrínsecas. Relojes atómicos de extrema precisión funcionan gracias a átomos de cesio enfriados. Los propios átomos ultrafríos pueden convertirse en un tipo de láser para la litografía atómica; grabarían circuitos integrados con líneas más estrechas que las inscritas por los métodos ordinarios. La aplicación tal vez más conocida, las pinzas ópticas, se desarrolló en paralelo con el enfriamiento por láser. Un láser se enfoca en un punto, el "estrechamiento del haz", donde se produce un campo eléctrico muy fuerte, que atrae hasta el estrechamiento a las partículas



2. LA LUZ CON MOMENTO ANGULAR ORBITAL tiene frentes de fase —los lugares con una misma fase del campo eléctrico, por ejemplo las crestas de las ondas— retorcidos alrededor de la dirección de propagación del haz. En el centro se muestran a lo largo de una longitud de onda los frentes de fase de los haces de luz con *l* unidades de momento angular orbital. (Los valores de *l* positivos y negativos corresponden a direcciones de giro en el sentido de las agujas del reloj y en el contrario, respectivamente.) La fase de estos haces luminosos cambia *l* veces de 0 grados a 360 grados alrededor de la sección del haz, tal como se ve en las imágenes irisadas de la derecha (las crestas son rojas, los valles azul claro). En el centro del haz, la fase no está definida y la intensidad se anula, de ahí que la distribución de la intensidad de la luz en la sección del haz adquiera forma de rosquilla, como se ve a la izquierda. El radio del anillo aumenta con el momento angular orbital y lo hace con la raíz cuadrada del valor absoluto de *l*.

SONJA FRANKE-ARNOLD Y AIDAN ARNOLD/*American Scientist*

que miden micras y a los átomos. Desplazando y ajustando el haz se manejan las partículas.

Las partículas microscópicas utilizadas en el pinzamiento óptico son gigantescas comparadas con un átomo. Sin embargo, es posible utilizar técnicas relacionadas con las pinzas ópticas incluso a nivel atómico. Ashkin estaba también en el equipo que creó la primera trampa de átomos totalmente óptica. En los laboratorios de óptica atómica de todo el mundo se utilizan fuerzas ópticas, magnéticas y de otros tipos para generar condensados gaseosos de Bose-Einstein (CBE), una forma de materia totalmente diferente de los sólidos, líquidos o gases. Los átomos se atrapan y se enfrían a temperaturas de sólo unos nanokelvin por encima del cero absoluto: hacen que los CBE sean la sustancia más fría del universo conocido.

Los átomos a temperatura ambiente se mueven a una velocidad media parecida a la del sonido; los átomos de un CBE avanzan sólo unos milímetros por segundo. Pero la propiedad más importante del CBE es que todos sus átomos están exactamente en el mismo estado cuántico (el más bajo posible), tienen la misma energía y oscilan a la vez (de manera muy parecida al color, la fase y la dirección clonadas de los fotones coherentes de un rayo láser).

Momentos angulares

Sin embargo, atrapar átomos en un solo lugar puede atar las manos. Que los átomos pudieran sujetarse a un movimiento controlado resultaría útil para la memoria de un computador atómico, entre otras numerosas aplicaciones. Aquí, la luz nos da también algunas opciones, gracias a la polarización. La dirección, o vector, del campo eléctrico de un haz de luz siempre oscila en un plano perpendicular a la dirección del movimiento de la luz. Si la luz se halla linealmente polarizada, el vector del campo eléctrico se mueve arriba y abajo, trazando una línea recta cuando la onda luminosa se mira de frente. Muchas gafas de sol tienen filtros polarizantes que bloquean la luz reflejada por el agua o la nieve, polarizada horizontalmente.

Si la luz se compone de dos ondas polarizadas linealmente, con la misma amplitud pero formando un ángulo de 90 grados entre sí y con un desfase completo entre ellas, su campo eléctrico viajará helicoidalmente a lo largo de la dirección del movimiento de la luz. La sección transversal de este campo es un círculo; se dice que la luz está polarizada circularmente. La polarización de la luz puede cambiarse fácilmente mediante la inserción de un filtro —una lámina de retraso de un cuarto de onda—, en el haz de luz; se frena así uno de los componentes del vector campo eléctrico y se transforma la luz polarizada linealmente en luz polarizada circularmente, o viceversa. La luz polarizada circularmente lleva momento angular de espín; sus fotones pueden impartir esta fuerza a los átomos, no sólo para atraparlos, sino también para hacerlos girar de una forma muy predecible.

El descubrimiento del momento angular de la luz se remonta a 1909, cuando el físico John Henry Poynting calculó el momento de un haz de luz y también su flujo de energía (el ritmo al que la energía fluye a través de un medio). La dirección del flujo de energía fue llamada, en su honor, vector de Poynting. En este cálculo Poynting aplicó la teoría de Maxwell del electromagnetismo, que por entonces aún era reciente. Poynting razonó también que la luz polarizada circularmente debía llevar momento angular, una idea que fue confirmada 25 años más tarde en los laboriosos experimentos de Richard A. Beth, de la Universidad de Princeton.

Pero ha sido sólo recientemente, en 1992, cuando un grupo de físicos del laboratorio de Han Woerdman, de la Universidad de Leiden, se percató de que no todo el momento angular de la luz se halla en la forma de polarización circular: además del momento angular de espín, un haz de luz puede también tener momento angular orbital. Desde entonces, se ha investigado el momento angular orbital de la luz en muchos experimentos, al principio con técnicas clásicas y, cada vez más, a nivel cuántico. Ahora se lo estudia en distintos contextos, de las pinzas ópticas y las interacciones luz-átomo al procesado de información cuántica.

Toda luz lleva momento lineal. A cada fotón le corresponde un momento lineal que es una pequeña fracción de su frecuencia. El momento angular orbital aparece si los frentes de fase de la luz —es decir, para un instante dado, las superficies donde toma un mismo valor el ángulo que rige el perfil de la onda— se doblan en el espacio, de suerte tal que el flujo de energía local (el vector de Poynting) describa una espiral alrede-

dor de la dirección de propagación de la luz. Mientras que el momento lineal se asocia con el "empuje" de la luz, su momento angular orbital está asociado a un movimiento de "torsión".

En mecánica, cualquier rotación puede dividirse en sus partes de espín y orbital: el espín se refiere a la rotación de la partícula en torno a su propio eje, mientras que la parte orbital se refiere a la rotación en torno a un eje de referencia fijo. Así, la Tierra gira alrededor de su eje una vez al día y, al mismo tiempo, orbita alrededor del Sol una vez al año. Para la luz se introdujo la misma terminología: la polarización circular se identificó con el momento angular de espín y la torsión de los frentes de fase con el momento angular orbital. Sin embargo, los momentos angulares de espín y orbital tienen un origen físico muy diferente. La polarización circular, o espín, viene dada por la rotación del vector campo eléctrico en torno al eje del haz. Esta rotación puede ser en sentido horario o antihorario; se habla de luz polarizada circularmente "a derechas" en el primer caso y de luz polarizada "a izquierdas" en el segundo. El campo eléctrico gira una vez en torno al eje del haz en una longitud de onda de la luz, mucho más deprisa de lo que podrían discernir nuestros ojos, que además son insensibles a la polarización de la luz.

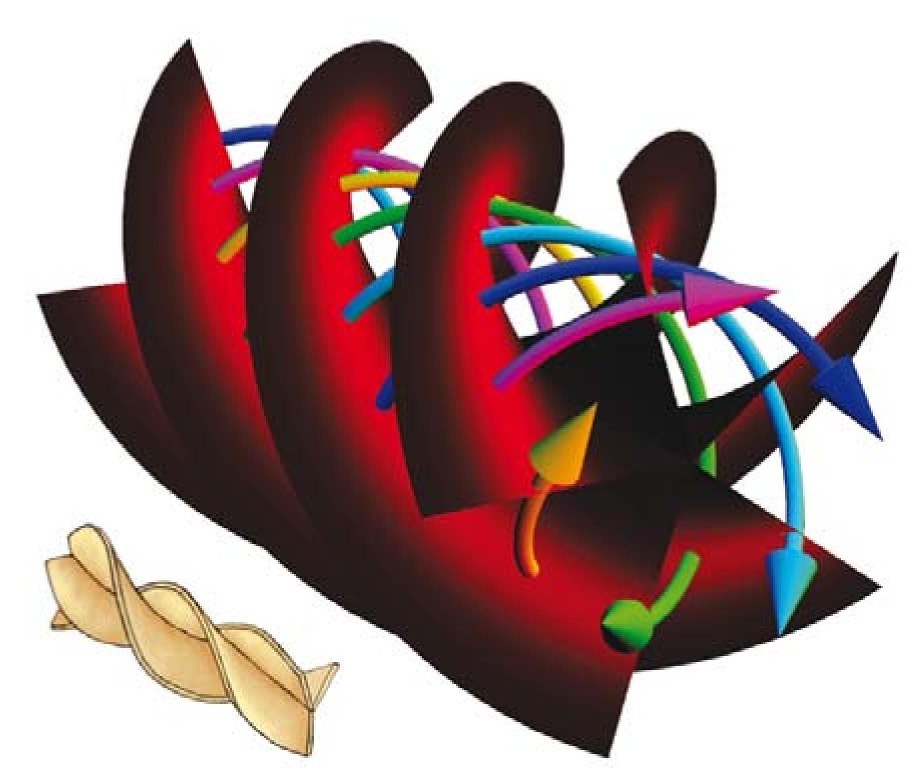
El momento angular orbital se halla asociado a la estructura de fases de la luz, fenómeno que no ocurre con el momento angular de espín. El momento angular orbital surge cuando los frentes de fase se retuercen alrededor de la dirección de propagación de la luz, como una escalera de caracol, una doble hélice de ADN o la triple hélice de los *fusilli*. La luz de láser, por lo general, no lleva momento angular orbital. La sección del haz tiene un centro brillante y su brillo decrece con una distribución de intensidad que cae en forma de campana, de manera que la sección transversal del haz se ve como un círculo que se desvanece hacia los bordes. Todas las crestas (y valles) de las ondas de luz llegan de manera uniforme a través de la sección del haz, un poco como las olas en un largo tramo recto de playa, salvo que a razón de mil billones de olas por segundo.

La luz que lleva momento angular orbital resulta muy diferente; su perfil de intensidad o el patrón que crea cuando incide en una superficie tiene la forma de un anillo en lugar de la de un disco. Sin embargo, la intensidad en forma de anillo es el resultado de la particular sección de la fase del haz: a los distintos puntos del anillo de luz las ondas de luz van llegando en momentos ligeramente diferentes. Los frentes de fase no se retuercen de una manera arbitraria: en todo punto de la onda luminosa la fase debe estar definida de forma única. Matemáticamente hablando, en cualquier ángulo la fase ha de ser la misma tras un giro completo de 360 grados: una longitud de onda más allá, el frente de fase habrá girado alrededor del centro del haz una vez en sentido de las agujas del reloj, o una vez en sentido contrario, o dos veces en cualquiera de los dos sentidos, y así sucesivamente.

El momento angular orbital por fotón depende del número de giros de los frentes de fase por longitud de onda de la luz (abreviado *l*). Esta relación fue puesta de manifiesto en 1992 por Les Allen y sus colaboradores, de la Universidad de Leiden. Los ejemplos más comunes de haces así son los haces de Laguerre-Gauss (con perfil de intensidad en forma de anillo) o los haces de Bessel (cuyas secciones transversales parecen dianas). Debido a su apariencia anular, los modos de Laguerre-Gauss se denominan en ocasiones modos "rosquilla". En el centro de esos haces luminosos la fase no está definida y el haz contiene una singularidad, o vórtice, alrededor de la cual los frentes de fase helicoidales se arremolinan, a una velocidad creciente a medida que se acerca a la región central.

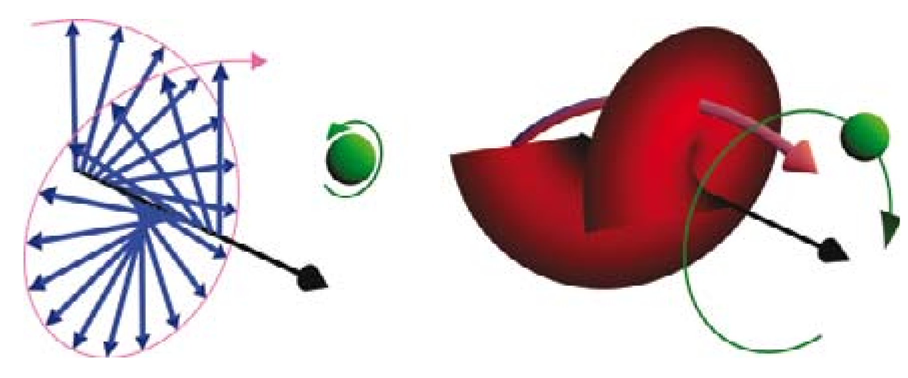
La física no permite fases indefinidas o velocidades infinitas. Por tanto, la intensidad de cualquier haz de luz físico con momento angular orbital se anula en el centro (y no se podrá decir ahí si se está en la cresta o en el valle de una onda o si se está en una calma absoluta). En el núcleo oscuro, todas las ondas con diferentes fases se superponen y se cancelan entre sí.

Si queremos convertir un haz láser en un modo de Laguerre-Gauss, hemos de modificar su estructura de fases. La manera más sencilla de lograrlo es pasarlo a través de una lámina de cristal que refracte la luz y tenga un espesor variable



3. LA LUZ LLEVARA MOMENTO ANGULAR ORBITAL si sus frentes de fase se retuercen alrededor de la dirección en que la luz se propaga. El momento lineal de la luz (es perpendicular a los frentes de fase y se representa con flechas de color) tiene un pequeño componente alrededor de la dirección de propagación, lo que crea un momento angular orbital. Esta imagen se ha estirado a lo largo del eje del haz para que se perciban los detalles; en realidad, los vectores son casi líneas rectas. El haz de luz, que presenta cinco giros, o simetría rotacional quíntuple, recuerda la figura de los *fusilli* (*abajo, a la izquierda*), tipo de pasta con simetría rotacional triple.

SONJA FRANKE-ARNOLD Y AIDAN ARNOLD/*American Scientist*



4. EL MOMENTO ANGULAR SE PUEDE TRANSFERIR de la luz a la materia. Basta poner una partícula no conductora micrométrica (*bola verde*) en el anillo brillante de un haz láser. Si el láser está circularmente polarizado, su campo eléctrico girará alrededor del eje del haz; podrá transferir este momento angular de espín a la partícula y hacerla girar en torno a su propio eje (*izquierda*). Si el láser tiene frentes de fase retorcidos podrá transferir momento angular orbital: la partícula girará alrededor del eje del haz (*derecha*).

SONJA FRANKE-ARNOLD Y AIDAN ARNOLD/*American Scientist*

que dependa del ángulo en torno al centro de la lámina, lo que retrasará la fase de una posición azimutal con respecto a la que esté a un ángulo diferente. Alternativamente se puede usar un tipo de filtro formado por rendijas que desviarán la luz, llamadas redes de difracción, que en este caso contendrán rendijas ahorquilladas, con un número l de puntas, en el centro del haz. La luz que se difracta en tales redes se retuerce y adopta la forma anular característica.

Puliendo la red, o cortando los bordes de las rendijas a ángulos muy determinados, podremos lograr que la mayor parte de la luz se dirija al primer orden —el primer máximo de la luz difractada— del patrón de difracción resultante, lo que transforma la luz láser incidente, sin momento angular orbital, en luz con l unidades de momento angular orbital. Podemos calcular el patrón que se requiere para ello imaginando que se trata del patrón de interferencia entre la luz incidente y el haz del momento angular orbital deseado. Como red de difracción valen simples películas fotográficas que lleven marcado el patrón correcto; o bien, y es lo más conveniente, cabe escribirlo con "moduladores espaciales de luz", unos dispositivos de cristal líquido pixelados que se controlan y reconfiguran con ordenadores. Programándole diferentes patrones de difracción, un mismo modulador puede generar haces con el momento angular orbital que se desee.

Hay dos estados de polarización del espín, la luz polarizada circularmente a izquierdas y a derechas. Por ello, suele emplearse la polarización como modelo de bit cuántico o *qubit*. A diferencia de los bits de los computadores normales, que pueden ser "1" o "0", un qubit puede ser una superposición de cantidades variables de "1" y "0", lo que resulta ventajoso para la solución de determinados problemas computacionales. El momento angular orbital de la luz, en cambio, puede tomar valores discretos infinitamente numerosos y se ha convertido en un popular modelo de *qudit*, un bit cuántico de más dimensiones. Ordenadores clásicos y ordenadores de qubits codifican la información en cadenas de unos y ceros, mientras que el momento angular orbital proporciona un alfabeto mayor en el que codificar la información. Cuando l es 0, esto podría corresponder a una A, l igual a 1 podría ser B, 2 podría ser C, y así sucesivamente.

El efecto del momento angular de la luz puede visualizarse transfiriéndolo a partículas microscópicas. En las regiones brillantes de los campos luminosos, una versión en miniatura del haz tractor de *Star Trek*, pueden quedar atrapadas partículas pequeñas dieléctricas (aislantes). El gradiente de la fuerza "tira" de las partículas hacia las regiones brillantes de la luz desintonizada al rojo, y las partículas se pueden mantener en su lugar y ser manipuladas en la posición focal.

En 1995, el grupo encabezado por Halina Rubinsztein-Dunlop, de la Universidad de Queensland, transfirió el momento angular orbital de un haz láser con fase helicoidal a una pequeña partícula cerámica que se mantenía suspendida en pinzas ópticas. Tres años más tarde, el mismo grupo utilizó una configuración similar para transferir momento angular de espín de un haz circularmente polarizado a una partícula birrefringente.

Poco después, Miles Padgett y sus colaboradores ampliaron estos experimentos con un dispositivo que permitía la transferencia tanto del momento angular de espín como del orbital a una partícula birrefringente, lo que se bautizó como "llave inglesa óptica". Atraparon una partícula de tamaño micrométrico en el anillo brillante de un haz de Laguerre-Gauss. La partícula rotó alrededor del eje del haz al aplicarle un haz con un momento angular orbital con un valor de l de 1. Esta rotación se podía parar (o acelerar) impartiendo un momento angular de espín adicional de –1 o 1 mediante el cambio de la polarización circular del haz de izquierda a derecha, de modo que el momento angular total o bien se anula o suma 2. Este experimento demostró la equivalencia mecánica de las fuerzas rotacionales impartidas por el momento angular de espín y orbital.

Conviene subrayar que el origen de la fuerza de pinzamiento que conduce a que las partículas queden atrapadas difiere del origen físico de la fuerza que causa la rotación. La fuerza de pinzamiento obedece a la refracción de la luz por las partículas; ese fenómeno transfiere el momento lineal de la luz a la partícula, y la fuerza actúa en la dirección radial. La fuerza que causa la rotación, en cambio, surge de una transferencia de momento lineal en la dirección azimutal, la dirección sin un gradiente de intensidad.

Cristales ópticos

En experimentos recientes, la luz retorcida que lleva momento angular orbital se ha utilizado para atrapar y manipular átomos e incluso para transferir momento angular orbital a átomos fríos y condensados de Bose-Einstein. Los experimentos atómicos iniciales con haces láser de Laguerre-Gauss se basaban en la estructura de intensidad espacial de la luz retorcida, más que en su estructura de fases; es decir, el momento angular orbital de la luz no desempeñaba ningún papel. Un solo haz de Laguerre-Gauss con su eje oscuro cilíndricamente rodeado de un tubo de luz brillante puede formar una "conducción óptica". Con luz desintonizada al azul, la fuerza óptica dipolar atrae a los átomos al centro oscuro. En 2001, el grupo de Klaus Sengstock, de la Universidad de Hannover, guió condensados de Bose-Einstein a lo largo de

esas conducciones de luz. Unos años antes, Takahiro Kuga y su grupo de la Universidad de Tokio “enchufaron” una conducción de luz, en ambos extremos, a luz adicional desintonizada al azul, con el fin de atrapar átomos fríos. De utilizar un haz de Laguerre-Gauss desintonizado al rojo, los átomos pueden almacenarse en el largo y brillante “cilindro óptico”.

¿Qué sucede cuando agregamos otro haz láser retorcido a la mezcla? Estamos rodeados de innumerables ondas de tipos muy diferentes: las del agua, las del sonido y la enorme gama de ondas electromagnéticas, el espectro entero, de las ondas de radio hasta los rayos X y la radiación gamma, pasando por la luz visible. Todas las ondas comparten un mismo fenómeno: cuando dos se superponen, interfieren. Dos crestas de ondas en el mismo lugar y tiempo están en fase; se suman constructivamente para formar una cresta de onda mayor. Si, en cambio, una cresta de una onda y un valle de otra del mismo tamaño coinciden, las ondas se anulan. Cuando la luz de dos fuentes luminosas coherentes separadas horizontalmente se combinan en una pantalla lejana, se observa un patrón de interferencia: unas franjas verticales claras y oscuras, donde las ondas de luz de las dos fuentes se combinan con fases iguales y opuestas, respectivamente.

Consideremos ahora dos haces de Laguerre-Gauss que viajen en la misma dirección. A diferencia de la interferencia de las ondas de agua o de las ondas planas de la luz, la fase de cada onda no es uniforme en la sección del haz, sino que cambia con el ángulo azimutal. Los dos haces de Laguerre-Gauss estarán, pues, en fase en algunos ángulos y no en otros. Hasta cierto punto, podemos ilustrar este efecto con un reloj analógico. La aguja de los minutos gira alrededor de la esfera del reloj 12 veces más deprisa que la aguja de las horas. Las agujas de los minutos y de las horas están alineadas 11 veces distintas durante medio día; por citar unas, a las 1:05:27, 2:10:55 y 12:00:00. Del mismo modo, un haz de Laguerre-Gauss con una l de 1 (l_1) está en fase con otro con una l de 12 (l_2) en 11 ángulos, en cuyos puntos los haces interfieren constructivamente.

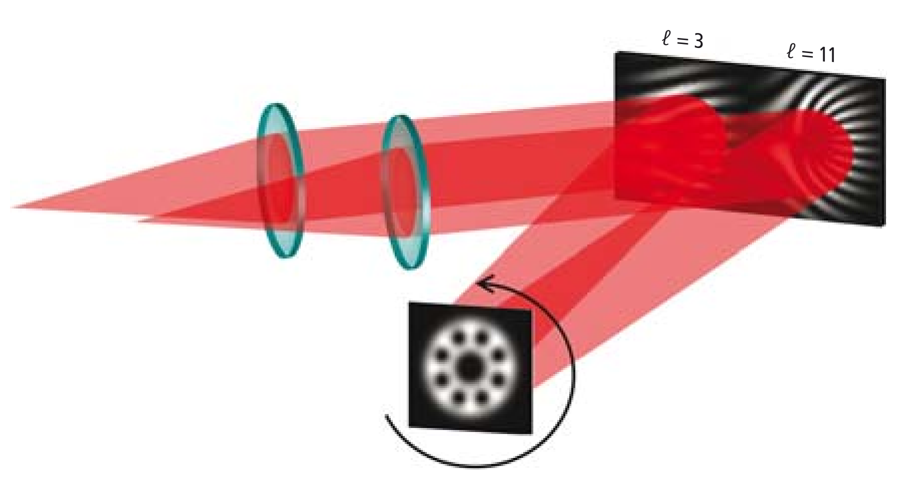
Las manecillas del reloj se hallan también lo más alejadas en 11 ocasiones distintas (por ejemplo, a las 12:32:44 y a las 11:27:16). Corresponde a los ángulos en que los haces de Laguerre-Gauss están exactamente fuera de fase, por lo que el haz combinado alcanza ahí la mayor oscuridad. Para adaptar la analogía a los haces más generales de Laguerre-Gauss, precisaríamos un extraño reloj en el que una aguja girara l_1 veces por cada l_2 rotaciones de la otra manecilla (valores negativos de l implican una rotación antihoraria). La limitación de la analogía es que para haces láser de Laguerre-Gauss combinados, todas las regiones claras y oscuras se pueden ver simultáneamente. Utilizamos tales interferencias para generar redes de anillos ópticos que sirvan para confinar átomos en las regiones brillantes o en las oscuras del patrón de interferencia.

Las redes ópticas han entrado de firme en la investigación con átomos fríos. Una red óptica confina los átomos en posiciones regularmente espaciadas, como en la red de átomos de un cristal puro, de diamante por ejemplo. Superponiendo diferentes haces de luz, se genera un patrón de interferencia con regiones brillantes y oscuras alternas: un cristal óptico. Las redes ópticas podrían proporcionar una realización física de un registro cuántico, donde los átomos de cada celda luminosa correspondan a un bit cuántico de información.

A través de las redes ópticas podemos ahondar asimismo en los problemas comúnmente asociados con la física del estado sólido, pero que permiten a los investigadores cambiar ciertos parámetros de su cristal artificial a voluntad. En fecha reciente hemos abordado una configuración óptica que se usará para atrapar átomos fríos en una red anular. Una red óptica estándar es un “cubo” con lados de unas 100 posiciones. Los cristales puros en estado sólido pueden ser mucho más extensos. Puesto que el anillo carece de punto de inicio o de final, una red anular constituye una buena aproximación a una red unidimensional infinita; de notable interés, pues los efectos cuánticos son más fuertes con menos dimensiones.

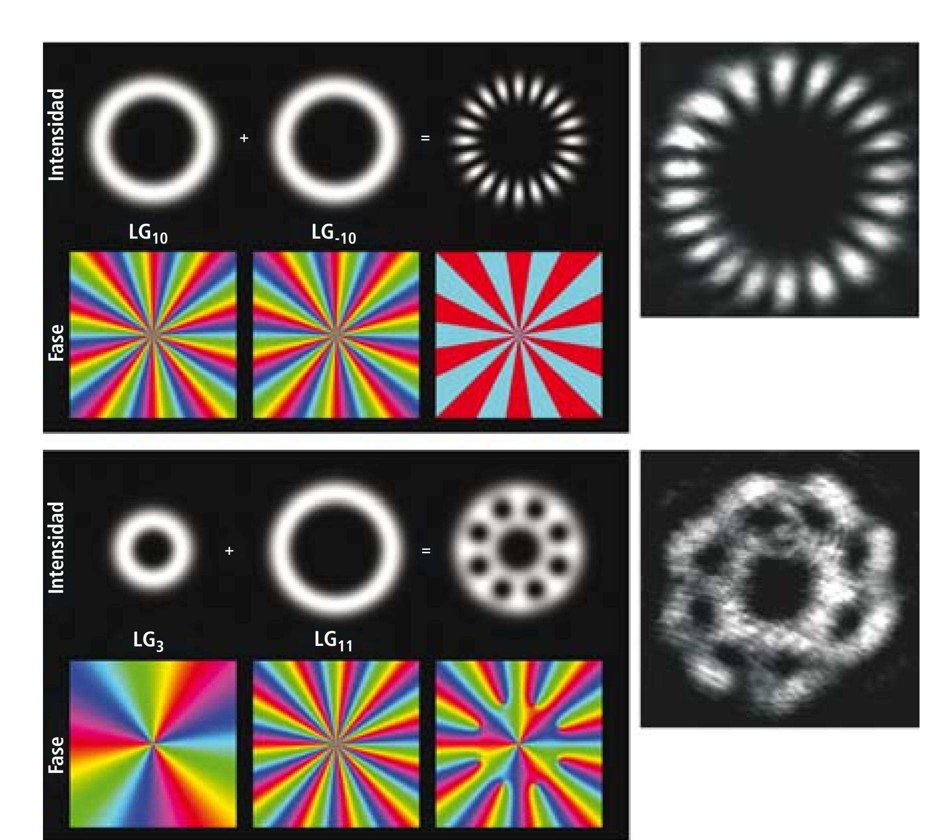
Hemos creado nuestra red anular óptica experimentalmente mediante superposición de dos haces de luz que llevan momento angular orbital. Al superponer dos haces de Laguerre-Gauss que se copropagan con valores opuestos de l, los haces interfieren constructivamente en ángulos en los que sus fases coinciden y destructivamente entre ellos, en los que están exactamente fuera de fase. La figura de interferencia resultante es un anillo de $2l$ regiones brillantes. Con luz desintonizada al rojo, los átomos pueden ser atrapados en estos sitios de la red mediante la fuerza dipolar óptica.

En opción alternativa podemos generar redes con regiones de intensidad oscura rodeada de luz brillante, mediante la elección de pares apropiados de haces de Laguerre-Gauss con diferentes mo-



5. PARA CREAR UN PATRON DE INTERFERENCIA estable entre dos láseres partiremos de un haz láser, que dividiremos en dos. Obtenido ese par de haces idénticos, se enfocan ambos en un modulador espacial de luz (*arriba a la derecha*). Esta pantalla de cristal líquido se encuentra programada con un par de figuras holográficas diferentes, una para cada haz, que difractan los haces en diferente medida y les dan diferentes cantidades de momento angular orbital (en este caso, una *l* de 3 a la izquierda y de 11 a la derecha). Superponiendo los haces, se genera una figura de interferencia, aquí con 11 – 3 = 8 regiones oscuras dentro de un anillo de intensidad brillante, que rota debido a la diferencia de frecuencias entre los dos haces. La noria óptica creada podrá atrapar y girar átomos.

SONJA FRANKE-ARNOLD Y AIDAN ARNOLD/*American Scientist*



6. LA INTERFERENCIA DE DOS HACES DE LUZ con distinto momento angular orbital produce patrones luminosos específicos, con la intensidad modulada en torno a la red anular resultante. El valor absoluto de *l* (el momento angular orbital) del primer haz, restado del que tiene el segundo, da el número de franjas brillantes (*superior*) u oscuras (*inferior*). Las imágenes en blanco y negro muestran secciones de intensidad de haz; las coloreadas, las secciones de fase. Moverse una vez a través del arco iris equivale al cambio de fase en una longitud de onda. A la derecha se ven resultados experimentales que muestran estas redes anulares brillantes y oscuras.

SONJA FRANKE-ARNOLD Y AIDAN ARNOLD/*American Scientist*

mentos angulares orbitales. El radio del anillo de intensidad brillante de los haces de Laguerre-Gauss aumenta con la raíz cuadrada del valor absoluto de *l*, de manera que el anillo de intensidad del haz con el mayor momento angular orbital tiene un radio mayor.

Al mismo tiempo, el pico de intensidad de un haz disminuye de nuevo por el mismo valor, la raíz cuadrada del valor absoluto de *l* y, para igual potencia, el anillo de intensidad exterior es más débil que el otro. Sin embargo, la interferencia completa constructiva o destructiva exige la igualdad de intensidades de luz; se produce, pues, a un radio donde se equilibran las intensidades luminosas de los dos haces. Eligiendo los momentos angulares orbitales de los haces a fin de que los anillos estén separados por la anchura de un anillo y ajustando la potencia del haz de modo que, idealmente, los anillos tengan la misma intensidad de pico, podemos crear un anillo brillante con un número de regiones oscuras igual al valor absoluto de $l_2 - l_1$.

Resaltemos que las regiones oscuras se forman en posiciones en que la fase es singular, en las posiciones de vórtices (en otras palabras, los núcleos oscuros alrededor de los cuales giran los frentes de fase). Esto asegura que los sitios oscuros de la red son real y verdaderamente oscuros.

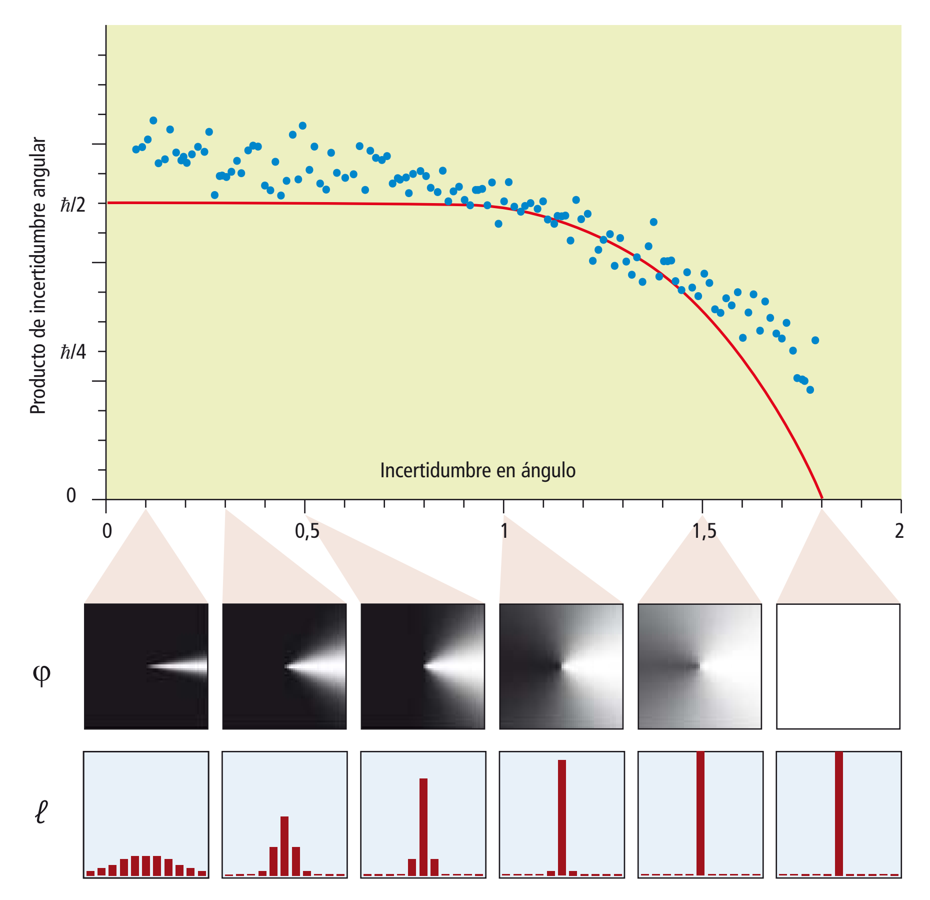
Los potenciales de las redes anulares ópticas, tanto las claras como las oscuras, pueden confinar fuertemente los átomos en la dirección transversal al haz, pero no confinan suficientemente los átomos a lo largo del eje del haz. En el caso de una red brillante desintonizada al rojo, el limitado confinamiento axial puede lograrse mediante una intensa focalización del el haz; mas, por lo general, eso no bastará para confinar átomos relativamente "calientes". Podemos resolver el problema con una trampa magnética en conjunción con la trampa óptica. La trampa magnética proporciona el intenso confinamiento axial requerido para prevenir fugas de átomos fuera de la red anular a lo largo del eje del haz. Una vez confinados en la red anular, los átomos pueden enfriarse por evaporación. Aunque la refrigeración por evaporación pierde una importante cantidad de átomos (sólo el 0,1 por ciento de los átomos iniciales permanece), podría utilizarse para formar condensados de Bose-Einstein en los lugares de una red anular magnetoóptica.

Norias ópticas

Hasta el momento sólo hemos considerado la posibilidad de tender una red anular estática mediante dos haces de Laguerre-Gauss de igual frecuencia. Si nuestros dos haces de Laguerre-Gauss tienen frecuencias distintas, el espacio entre las crestas de las ondas de los dos haces individuales diferirá, a su vez. Los músicos conocen ese efecto cuando afinan sus instrumentos. Si dos violinistas tocan una nota similar en instrumentos desafinados, el resultado es un sonido cuya frecuencia es la media de las dos notas, pero el volumen del sonido sube y baja a un ritmo equivalente a la diferencia de frecuencias de las dos notas (frecuencia de pulsación). Un músico puede eliminar la disparidad de las frecuencias apretando o aflojando la cuerda del violín hasta que la nota pulsante desaparece y ambos instrumentos producen ondas sonoras a la misma frecuencia. La nota acústica pulsante describe un patrón de interferencia variable entre las dos ondas sonoras.

En cambio, la interferencia de nuestros dos haces de Laguerre-Gauss a diferentes frecuencias produce una rotación de la red anular de una posición a la siguiente a un ritmo dado por la diferencia entre las dos frecuencias luminosas. El patrón de interferencia resultante se denomina noria óptica, pues, cuando gira, se parece mucho a esas atracciones de feria.

No deja de resultar sorprendente que podamos sintonizar manualmente ondas de sonido audibles (con frecuencias de 50 a 20.000 hertz) con una precisión de menos de 1 hertz. En el caso de frecuencias ópticas (que oscilan cien mil millones de veces más rápido, a unos 10^{15} hertz), conseguir una estabilidad absoluta similar cae en el actual límite experimental de los relojes atómicos y ópticos. En vez de eso, utilizamos un solo haz láser con una frecuencia fija, lo desdoblamos en dos partes idénticas con un separador de haz y ajustamos la frecuencia de cada haz



7. EL MOMENTO ANGULAR ORBITAL podría aplicarse a la encriptación de datos. Si el equipo de un receptor no está exactamente alineado con un haz o no cubre toda una sección de 360 grados del haz, el detector verá una mezcla de momentos angulares orbitales en lugar del original. Este "principio de incertidumbre angular" teórico (*curva roja*) se ha confirmado experimentalmente (*puntos azules*). Un haz de luz, sin momento angular orbital, transmitido a través de una máscara angular gana componentes de momento angular orbital (*fila media de imágenes*). Cuanto más se limita el ángulo, más amplia se hace la distribución de los momentos angulares (*fila inferior de gráficos*). Para ángulos estrechos, el producto de incertidumbres es la mitad de ħ (la unidad de momento angular de espín).

SONJA FRANKE-ARNOLD Y AIDAN ARNOLD/*American Scientist*

de forma independiente en cuantía casi idéntica. De esa manera podemos formar redes anulares estáticas o capacitadas para rotar de una posición de la red a la siguiente con frecuencias que van de las fracciones de hertz a los millones de hertz. Cabe imaginar que tal red anular giratoria podría operar como memoria cuántica; los átomos en cada posición de la red almacenarían información cuántica.

Otra característica dinámica de nuestra red: podemos convertir poco a poco la red anular en una trampa anular uniforme variando el brillo relativo de los dos haces láser de Gauss-Laguerre. Bajando las barreras de potencial entre las posiciones individuales, se permite que los átomos dejen sus posiciones iniciales en la red y circulen con libertad por el anillo.

En el caso de la red brillante se podría desintonizar un haz de Laguerre-Gauss, de manera que los átomos se mantuvieran en el anillo de intensidad brillante del otro haz de Laguerre-Gauss. En el caso de la red oscura, el haz Laguerre-Gauss con el mayor momento angular orbital y, por tanto, el anillo más exterior, podría atenuarse gradualmente; los átomos quedarían confinados, separados del interior por la región intensa del anillo de Laguerre-Gauss interior y del exterior por el potencial magnético del campo magnético cuadrupolar.

Si las posiciones de la red contienen un condensado de Bose-Einstein (que es un superfluido, como el helio líquido), la capacidad de hacer rotar la red podría permitir la generación de corrientes persistentes alrededor del anillo.

La red anular óptica ofrece una herramienta versátil para atrapar y girar átomos en las posiciones de las redes brillantes u oscuras, y permite la transición entre una red anular y una trampa anular uniforme. Al estimar los parámetros experimentales requeridos, encontramos condiciones favorables para realizar una noria óptica para átomos de rubidio fríos. Tenemos previsto confinar y manipular un condensado de Bose-Einstein en la Universidad de Strathclyde en una noria óptica oscura.

Además de la noria, hay otras geometrías de atrapamiento interesantes con luz retorcida. El grupo de Daniel Hennequin, de la Universidad de la Ciencia y la Técnica de Lille, ha creado una trampa que consiste en una pila (o red) de anillos atómicos concéntricos. El grupo de Francesco S. Cataliotti, de la Universidad de Florencia, ha concebido un sistema teórico de haces con momento angular orbital que produciría una pila de redes anulares concéntricas. Téngase en cuenta que, si se giran en torno al eje del haz trampas formadas por haces láser que se propagan en sentido contrario, ese movimiento se acompañará de una traslación a lo largo del eje del haz. Disponemos de amplia variedad de formas de crear una trampa dipolar oscura, o una trampa anular oscura. Algunas trampas de éstas pueden utilizar luz con momento angular orbital.

Hemos hablado del uso "pasivo" de la luz con momento angular orbital como receptáculo dinámico para el almacenamiento de átomos fríos. Sin embargo, en algunos experimentos recientes se ha logrado ya transferir directamente momento angular orbital de fotones a átomos, y viceversa. Conocemos el mecanismo

Los autores

Sonja Franke-Arnold, adscrita al Consejo de Investigación del Reino Unido, viene enseñando desde 2005 en la Universidad de Glasgow. Recibió su doctorado en la Universidad de Innsbruck en 1999. Antes había sido becaria de investigación de la Real Sociedad de Edimburgo. Se interesa por aspectos teóricos y experimentales de la óptica atómica, la óptica cuántica y el momento angular orbital. **Aidan Arnold**, docente de óptica atómica en la Universidad de Strathclyde, recibió su doctorado en la Universidad de Sussex en 1999 por sus experimentos de focalización magnética con el primer condensado de Bose-Einstein en el Reino Unido. Con la ayuda de su beca de la Real Sociedad de Edimburgo su equipo creó uno de los primeros anillos de almacenamiento de condensados de Bose-Einstein en 2005.

en cuya virtud el momento lineal y el momento angular de espín se transfieren de la luz a los átomos; menos palmaria nos resulta, en cambio, la acción del momento angular orbital.

La transferencia de momento lineal está vinculada a la presión de la radiación y a la fuerza de dispersión. El momento angular de espín se puede transferir de la luz circularmente polarizada al átomo induciendo transiciones entre diferentes estados atómicos de espín. El momento angular orbital de la luz, en cambio, afecta al movimiento de partículas, si bien se ha conjeturado que las transiciones cuadrupolares —las transiciones entre estados atómicos que se diferencian por dos unidades de momento angular de espín— pueden causar un cambio en el momento angular orbital del haz de luz, ya que la polarización por sí sola no proporciona el suficiente momento angular para satisfacer el principio de conservación durante estos procesos "prohibidos".

Kozuma y sus colaboradores prepararon átomos con un momento angular orbital mecánico y lo transfirieron a un haz de luz. El proceso inverso también es posible: el grupo de Phillips transfirió el momento angular orbital de la luz a los átomos, creando un estado circulante. Con condensados de Bose-Einstein preparados en una trampa anular, lograron incluso usar luz retorcida para generar una corriente circulante persistente en un estado de vórtice.

Angulos inciertos

Entre las leyes físicas más afamadas sobresale el principio de incertidumbre de Heisenberg. Afirma que no se pueden conocer a la vez el momento y la posición de una partícula con una precisión tan alta como se quiera. En el mundo clásico no importa, ya que los errores de medición debidos a herramientas imprecisas superan en mucho la pequeña cuantía de la incertidumbre de la mecánica cuántica. Sin embargo, cuando se trata de átomos o fotones individuales, la incertidumbre de la mecánica cuántica puede ser el principal factor y, además, nunca podrá ser superado. Posición y momento no son los únicos observables vinculados por una relación de incertidumbre. Así como no se puede saber a la vez con total precisión dónde está una partícula y a qué velocidad se está moviendo, no se puede saber a la vez cuándo tiene lugar un suceso y cuánta energía implica. En 2004 una de nosotros (Franke-Arnold) y sus colaboradores de las universidades de Glasgow y de Strathclyde investigaron otro principio de incertidumbre, entre el momento angular de una partícula y su posición angular.

Si la sección de un haz de luz con un momento angular orbital fijo, digamos que con una l de 3, se oscurece con una máscara —bloqueando la mitad del haz—, el momento angular ya no está bien definido; el haz aún contiene luz con una l de 3, aunque también un poco de luz con diferentes momentos angulares orbitales, con l de 2 y 4, y menos luz con l de 1 y 5, y así sucesivamente. A fin de saber el momento angular orbital se necesita acceder a todo el ángulo de 360 grados de la sección del haz.

La relación de incertidumbre angular podría ofrecer algún tipo de seguridad si se codificara información secreta en los estados de momento angular orbital. Imaginemos que un emisor y un receptor acuerdan un código escrito en estados de momento angular orbital, y que el emisor transmite un haz con un determinado momento angular orbital. Un espía trataría de interceptar el mensaje. Ahora bien, si el instrumental del espía no está exactamente alineado con el haz o no cubre toda una sección de 360 grados del haz, no podrá leer correctamente el momento orbital original: detectará una mezcla de momentos angulares orbitales.

A un nivel más fundamental, la relación de incertidumbre angular resulta más complicada que su equivalente lineal. La incertidumbre en la posición puede extenderse desde valores infinitamente pequeños (si sabemos dónde está la partícula) hasta valores infinitamente grandes (si no lo sabemos en absoluto). Igual sucede con la incertidumbre en el momento. Su producto, sin embargo, tiene un límite fijo de la incertidumbre, la mitad de la constante de Planck $\hbar$. En cambio, la posición angular siempre debe estar dentro del rango finito entre 0 y 360 grados, de ahí que el límite de la incertidumbre ya no tenga un valor fijo, sino que cambie dependiendo de la abertura angular. Aun cuando la abertura sea completa y la luz se distribuya uniformemente sobre los 360 grados, la incertidumbre en el ángulo tiene su valor máximo, 1,81. Para el momento angular orbital hay entonces una incertidumbre nula. El producto de incertidumbres es, por lo tanto, también cero: se supera el límite ordinario. Para ángulos de apertura muy pequeños, la incertidumbre del momento angular orbital aumenta y el producto de incertidumbres se aproxima a la mitad de $\hbar$. Nuestros experimentos, que han medido el espectro del momento angular orbital de luz que atravesaba máscaras angulares, han confirmado la relación de incertidumbre.

Estamos rodeados de luz que lleva momento angular orbital; un detallado examen de la luz dispersada por la áspera superficie de un muro, por ejemplo, revelaría muchas zonas de oscuridad a cuyo alrededor gira el momento de la luz. Sin embargo, como tema de investigación y, aun más, como instrumento óptico, el momento angular orbital es una sorprendente novedad. El momento angular orbital puede utilizarse en pinzas ópticas para girar pequeñas partículas o células biológicas. Puede generar exóticas trampas atómicas (anillos, botellas y redes anulares dinámicas con barreras ajustables). El momento angular orbital puede transferirse de la luz a átomos ultrafríos, induciendo vórtices y corrientes orbitales, y sirve como modelo para aplicaciones en criptografía cuántica.

Dada la infinidad de usos de la luz con momento angular orbital y la relativa facilidad con que se pueden generar y optimizar en tiempo real, parece probable que su futuro sea brillante (aunque un tanto oscuro en su centro y retorcido).

Bibliografía complementaria

THE MECHANICAL EQUIVALENCE OF THE SPIN AND ORBITAL ANGULAR MOMENTUM OF LIGHT: AN OPTICAL SPANNER. N. B. Simpson, K. Dholakia, L. Allen y M. J. Padgett en *Optics Letters*, vol. 22, pág. 5254; 1997.

UNCERTAINTY PRINCIPLE FOR ANGULAR POSITION AND ANGULAR MOMENTUM. S. Franke-Arnold *et al.* en *New Journal of Physics*, vol. 6, pág. 103; 2004.

QUANTUM MANY PARTICLE SYSTEMS IN RINGSHAPED OPTICAL LATTICES. L. Amico, A. Osterloh y F. Cataliotti en *Physical Review Letters*, vol. 95063201; 2005.

DARK OPTICAL LATTICE OF RING TRAPS FOR COLD ATOMS. E. Courtade, O. Houde, J.-F. Clement, P. Verkerk y D. Hennequin en *Physical Review A*, vol. 74, pág. 031403(R); 2006.

OPTICAL FERRIS EHEEL FOR ULTRACOLD ATOMS. S. Franke-Arnold *et al*. en *Optics Express*, vol. 15, págs. 8619-8625; 2007.

Piratas del aire

Josep-Maria Gili y Anna Gili



▲ **1. Las fragatas suelen habitar en las regiones costeras, sobre todo en zonas tropicales como las islas del Caribe. Anidan en manglares.**

La piratería ha sido una práctica habitual en la historia de la navegación humana. Pero ese tipo de abordajes se producen también en el mundo natural. Las fragatas, magníficas aves marinas, se han especializado en robar el alimento a otras aves. Las atacan en pleno vuelo para forzarlas a soltar sus presas o vomitar lo que han ingerido. Se alimentan también de medusas, peces voladores, pequeñas tortugas y otros animales que encuentran en la superficie del mar.

Construyen sus nidos en manglares. Utilizan para ello ramitas que suelen robar de otros nidos. Carecen de depredadores. Alcanzan hasta los 40 años de edad. Su plumaje no es impermeable, por lo que no bucean; muestran poca habilidad al andar. Su cuerpo está magníficamente adaptado al vuelo: su forma aerodinámica ofrece escasa resistencia al viento. Dos filas de plumas, o tijeretas, rematan la cola. Pueden recorrer hasta 150 kilómetros diarios en busca de alimento; alcanzan velocidades de 35 kilómetros por hora. Son excelentes aves planeadoras y especialistas en vuelos acrobáticos. Su carácter agresivo ha dado nombre a una de las naves de guerra más belicosas: la fragata.



▲ 2. El macho muestra el saco gular en la parte inferior del cuello, sin plumas; en la época de celo lo infla para atraer a las hembras. Todo su plumaje es negro.

▲ 3. Hembra adulta de *Fregata magnificens*. A diferencia del macho, presenta un plumaje blanco en el pecho. Con las alas extendidas, alcanza una envergadura de 2,3 metros. Pesa sólo unos 1,5 kilogramos.

▼ 4. Los pollos nacen cada dos años. Una pareja cría un único pollo. Durante los tres primeros meses, ambos progenitores alimentan de forma alternativa a la cría; hasta los ocho meses, sólo la hembra. Alcanzan la madurez sexual a los siete años.

Saul Perlmutter: Fuerzas oscuras

Hace diez años, dos equipos de astrónomos descubrieron que el universo se ha venido expandiendo a un ritmo cada vez más rápido, impulsado por una energía invisible. Saul Perlmutter, que dirigía uno de esos grupos, confía en que nuevas observaciones iluminen pronto esa cara oscura del universo

David Appell

Saul Perlmutter, director del Proyecto de las Supernovas Cosmológicas, uno de los astrofísicos que más contribuyeron al descubrimiento de la aceleración de la expansión del universo —pocos habrá habido más asombrosos en la historia de la cosmología, y él anunció éste en 1998— disfruta con la confusión que las observaciones han creado. Se pregunta si la aceleración no será el factor crucial de la explicación última. El secreto quizá se encierre en "algo inesperado que se parezca a la aceleración", afirma. Espera y proyecta más observaciones: "Hasta que no hayamos obtenido muchos más datos, el campo seguirá inseguro".

Perlmutter filosofa acerca de la rareza del cosmos en su oficina del Laboratorio Nacional Lawrence en Berkeley, en las colinas occidentales de la bahía de San Francisco. El despacho aparece abarrotado de pantallas de ordenador y cerros de papeles; sobre una pizarra, ecuaciones que habrían enorgullecido a Einstein. La espectacular vista, a lo lejos, del *Golden Gate* incita a elevar la mirada.

Hace diez años de que se diera a conocer el descubrimiento del grupo de Perlmutter y, por separado, del equipo de la Búsqueda de Supernovas de Alto z, dirigido por Brian Schmidt, de la Universidad Nacional de Australia (con análisis realizados por Adam Riess, del Instituto de Ciencias del Telescopio Espacial).

Descubrir que la expansión se acelera requirió años de innovación y resolución de problemas. La clave fueron las supernovas, en concreto las de tipo Ia. Estos sucesos celestes, asombrosamente invariables, tienen un brillo intrínseco que se debilita con el tiempo de manera predecible. Por eso valen como "candelas estándares", referencias para medir distancias a la Tierra. Perlmutter colaboró en los años ochenta con Carl Pennypacker, de la Universidad de California en Berkeley, en la búsqueda robótica de supernovas no muy lejanas. Era una actividad tan en ciernes, que su mayor competidor era un astrónomo aficionado de Australia, Robert Evans, quien identificaba supernovas con un telescopio en el jardín de su casa.

Al principio, la mayor dificultad para el grupo de Perlmutter residía en el tiempo cedido para la observación telescópica, bien precioso entre los astrónomos. ¿Cómo convencer a los evaluadores de que les concedieran la oportunidad de observar algo —una explosión supernova— que todavía no había sucedido? Así que buscaron métodos para predecir y automatizar la detección de supernovas en una determinada región del cielo. Pero su objetivo de medir la dinámica del universo —admitíase por entonces que su expansión, dominada por la materia, se deceleraba— requería más observaciones, con las que determinar mejor el pico de brillo de la supernova y su posterior declive, que acontece en unas semanas. Perlmutter suplicaba a sus colegas una o dos horas de observaciones inmediatas.



GABRIELA HASBUN

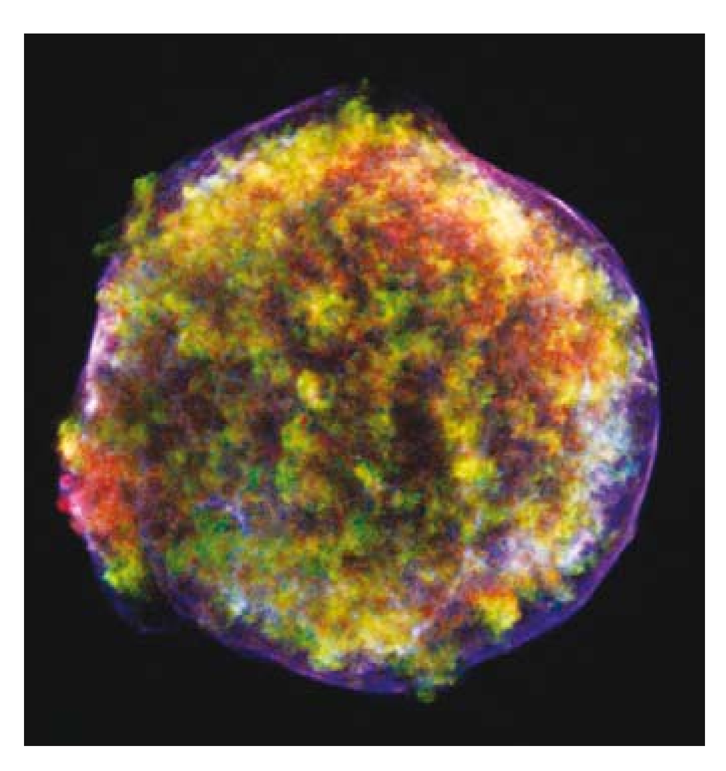
SAUL PERLMUTTER

EL NUEVO COSMOS: su Proyecto de las Supernovas Cosmológicas ha revelado que la expansión del universo se acelera, resultado que todavía ha de explicarse. Al mismo tiempo, otro grupo llegó a la misma conclusión. (Perlmutter aparece ante el modelo de la sonda "Sonda de las Supernovas y la Aceleración", de la que es científico principal).

TIEMPOS OSCUROS: los datos reunidos hasta ahora sugieren que sólo el 5 por ciento del universo está hecho de materia común; el resto es materia oscura (23 por ciento) y una fuerza de gravedad negativa llamada energía oscura (72 por ciento).

La constancia dio fruto. Las supernovas de tipo Ia lejanas resultaron ser más débiles de lo esperado. Tras eliminar la posibilidad del polvo intergaláctico y tras años de tomar datos y analizarlos con telescopios de todo el mundo (y en órbita), el equipo de Perlmutter llegó a la conclusión de que, por increíble que pareciese, el universo no sólo se expandía, según dedujera Edwin Hubble en 1929, sino que lo hacía a un ritmo cada vez mayor. Alguna fuerza desconocida, de presión negativa, parece estar ensanchando el universo.

Observaciones con globos del fondo cósmico de microondas mostraron dos años más tarde el carácter plano del universo; lo estiró una expansión exponencial, llamada inflación, justo después de la gran explosión. Las ecuaciones en que se basaban esos experimentos complementaban las que fundamentaban los resultados de unos años antes de los equipos de las supernovas. El conjunto de todos esos datos ha permitido calcular de manera independiente la densidad de la energía oscura y de la materia en el universo.



LAS SUPERNOVAS DE TIPO Ia, como la que en 1572 dejó este remanente, pueden elucidar la expansión cósmica si se observa el momento inicial de su explosión.

Por otra parte, el descubrimiento dio paso a un nuevo misterio de proporciones verdaderamente cósmicas. La explicación más sencilla de la aceleración declara que la energía oscura coincide con la famosa "constante cosmológica" de Einstein, una energía que bañaría el universo, aunque no interactuaría con ningún tipo de materia. Hoy se conoce ya con detalle la situación: el universo consistiría en un 72 por ciento de energía oscura antigravitatoria, un 23 por ciento de materia oscura (invisible y de naturaleza aún por determinar, pero sensible a la gravedad) y un 5 por ciento de materia normal (protones, neutrones, electrones). No seríamos más que una pequeña parte de un todo, inmersa en la perplejidad.

"Es posible que exista una gran parte de la realidad que no comprendemos", afirma Christopher Stubbs, de la Universidad de Harvard, quien en un artículo comparó el nuevo universo a "vivir en un episodio malo de *Star Trek*". Steven Weinberg, de la Universidad de Texas en Austin, lo llama "piedra en el zapato de la física teórica".

En los últimos años, los físicos han ampliado su búsqueda de explicaciones de la aceleración del universo más allá de la energía en el vacío; han pensado en modificaciones de la relatividad general, en campos de energía sin espín que varían con el tiempo y el espacio, en gravitones masivos, en mundos de supercuerdas con dimensiones adicionales. "Propuestas todas muy interesantes, pero ninguna va a reescribir los libros de texto", afirma Eric Linder, del Lawrence en Berkeley y de la Universidad de California en Berkeley. El hipotético campo de energía oscura repulsiva podría no sobrevivir en la explicación definitiva.

"Es cierto que los teóricos están ahora atascados", dice Perlmutter. "Pero desde el punto de vista de un experimentador, resulta fantástico: tenemos un misterio y medios para abordarlo": nuevos telescopios y satélites que investigarán mucho más lejos en el universo (y, por tanto, más atrás en el tiempo).

Las observaciones desde el suelo están ya reuniendo más datos. Buscan cientos de supernovas de tipo Ia (que se suman a la docena investigada por Perlmutter y Schmidt) para determinar la relación entre la presión y la densidad del universo, semejante a la ley de los gases ideales. Una galaxia semejante a la Vía Láctea exhibe una supernova de tipo Ia de cientos en cientos de años cuyo brillo se desvanecerá en pocas semanas. No es tarea sencilla dar con una. Las observaciones de la radiación del fondo cósmico de microondas del satélite Planck, que saldrá pronto al espacio, proporcionarán más detalles de la expansión del universo.

Los aficionados a la energía oscura miran con especial atención la "Misión Conjunta de la Energía Oscura", que EE.UU. está proyectando, con un posible lanzamiento en 2014. La sonda contará con un instrumento que rastreará miles de supernovas al año y proporcionará mediciones con barras de error mucho más pequeñas que cualquier observación que se haya realizado hasta ahora. Está también la "Sonda de Supernovas y la Aceleración", de la que Perlmutter es científico principal y Linder primer teórico. Se trataría de un telescopio de dos metros de diámetro con una cámara de gigapíxeles.

El descubrimiento de la aceleración cósmica seguramente será galardonado con un premio Nobel, y con los años ha habido alguna discusión acerca de cuál de los equipos merece la primacía. El grupo de Perlmutter fue el primero en anunciar el hallazgo y el de Schmidt, el primero en publicarlo. Tanto Perlmutter como Schmidt recibieron una cuarta parte del premio de cosmología Gruber en el año 2007; la fracción restante fue a parar al resto de uno y otro equipo.

Sociable y locuaz, Perlmutter, que hoy tiene 48 años, atribuye su éxito a haber sido capaz de transmitir su entusiasmo y haber convencido a otros investigadores de que se unieran a su grupo.

La revolución verde africana

Hace tiempo que la agricultura del continente negro debería haber recibido un empuje como el que ayudó a Asia

Jeffrey D. Sachs



Africa necesita una revolución verde. La producción de alimentos del continente asciende aproximadamente a una tonelada de cereal por hectárea de tierra cultivada, cantidad que no ha variado mucho en los últimos 50 años. Equivale a una tercera parte de lo que se produce en otros continentes. Desde mediados de los sesenta, se consiguió en regiones pobres de otras zonas del mundo aumentar la producción de alimentos con semillas de alto rendimiento, fertilizantes e irrigación a pequeña escala. Se sacó de la extrema pobreza a gran parte de la población.

Hasta que ocurra este cambio, las vastas zonas rurales africanas donde viven dos tercios de su población continuarán sumidas en la hambruna y la pobreza, con una alta tasa de mortalidad infantil y aisladas de la economía mundial de mercado. Técnicas probadas —semillas de alto rendimiento, nuevas técnicas de gestión del agua y fórmulas para la recuperación de los nutrientes del suelo— están alcanzando ya entre tres y cinco toneladas por hectárea en muchas partes de Africa, aunque, con demasiada frecuencia, sólo son pequeños proyectos experimentales.

Actualmente, decenas de millones de campesinos africanos, con cientos de millones de personas a su cargo, viven estancados en la mera subsistencia. Carecen de los ahorros o la solvencia necesarios para comprar semillas, abonos y técnicas hídricas. No cuentan siquiera con la mínima infraestructura local (carreteras, silos y tendido eléctrico) para participar y sacar beneficios de la economía de mercado, y ello les impide mejorar su situación.

Hasta hace poco, los donantes sólo respondían a la crisis agraria de Africa enviando ayuda alimentaria. Hoy están tomando conciencia del apremio de la única solución realista: aumentar la productividad agrícola a través de una revolución verde en suelo africano. Harían falta cuatro tipos de ayuda temporal: financiación para mejorar la agricultura, extensión de servicios para que los campesinos reciban asesoramiento sobre las nuevas técnicas, semilleros locales para diversificar la producción e inversión en infraestructuras. Las técnicas de mercado para la gestión financiera pueden también ofrecer, a los campesinos, seguros contra las adversidades climáticas.

Este es el momento propicio para actuar, por varias razones. La más importante es que los propios dirigentes africanos están priorizando la agricultura, lo que a menudo se ha traducido en un aumento considerable de las cosechas y los ingresos agrícolas. En sólo tres años, Malawi ha duplicado con creces su producción de alimentos merced a un atrevido programa del gobierno que, mediante subvenciones, asegura a todas las familias campesinas el acceso a fertilizantes y semillas de alto rendimiento. Otros países están siguiendo su ejemplo.

Instituciones internacionales como el Banco Mundial han vuelto a tomar las riendas de la agricultura después de años de esperar en vano a que los mercados, por sí solos, resolvieran el problema. El año pasado, una publicación interna apelaba al Banco Mundial y a los donantes a que "ayudaran a diseñar mecanismos eficaces, incluyendo asociaciones público-privadas, que proporcionasen a los campesinos el apoyo necesario".

También hay otros donantes internacionales que han ofrecido su ayuda. La Alianza por la Revolución Verde en Africa, patrocinada por las fundaciones Gates y Rockefeller, ha dado un enorme impulso a la solución del problema. Los gobiernos de los países ricos han prometido duplicar la ayuda a Africa entre 2004 y 2010, y gran parte de ella debería destinarse a la agricultura.

Existe una razón adicional por la que es urgente el cambio: la vulnerabilidad de Africa a la inseguridad alimentaria se ha disparado. No hay comida suficiente para abastecer a toda la población. El cambio climático provoca estragos en la producción de cereales. El agotamiento de los nutrientes del suelo ha alcanzado proporciones alarmantes. La importación neta de alimentos se ha convertido en una carga agobiante para Africa con la vertiginosa subida de los precios de la comida en el mundo. Este camino conduce al desastre.

Africa y sus socios donantes podrían plantearse algunos objetivos, atrevidos pero realistas: doblar la producción de cereal en 2012, para que en una década, al menos tres de cada cuatro familias de pequeños campesinos puedan pasar de la agricultura de subsistencia a la comercial; y expandir los programas de nutrición incrementando, a la vez, la producción de alimentos para que en 2015 se haya reducido el número de hambrientos por lo menos a la mitad.

Deberíamos crear un fondo especial para la revolución verde en Africa, equiparable al Fondo Global para la Lucha contra el Sida, la Tuberculosis y la Malaria, que está teniendo éxito. Con un desembolso anual de diez mil millones de dólares de los países ricos, la mitad a través del fondo, se podrían financiar los importantísimos avances que se necesitan. Supondría aproximadamente 10 dólares por habitante de cada país donante, una suma modesta que ofrecería a Africa la oportunidad histórica de erradicar la extrema pobreza y el hambre crónico de cientos de millones de sus habitantes.

Jeffrey D. Sachs es director del Instituto de la Tierra de la Universidad de Columbia.

MATT COLLINS

El gazpacho

Por sus propiedades organolépticas y nutritivas, esta emulsión fría y acética de hortalizas crudas resulta ideal para el verano

Pere Castells



El gazpacho constituye una de las elaboraciones más emblemáticas de la cocina española. Deriva de la sopa fría de pan, sal, aceite, vinagre y ajo. Si bien los gazpachos más antiguos son anteriores a la introducción del tomate y el pimiento, que llegarían de América, nos referiremos en esta sección al típico gazpacho andaluz, que basa su receta en ellos.

Ajo, tomate, pan, pepino y pimiento constituyen los ingredientes más frecuentes del gazpacho andaluz. Suele condimentarse con aceite de oliva, vinagre de vino y sal. No confundir con el gazpacho manchego, guiso que incluye trocitos de ave o liebre, y se extiende sobre una base de pan ácimo o torta cocida entre las brasas. La receta no es única; varía según la región, el pueblo e incluso la casa. Unos añaden uvas, otros hierbabuena, trocitos de jamón, huevo, limón en vez de vinagre, etcétera.

Podemos clasificar los ingredientes en tres categorías: básicos (ajo, aceite de oliva, vinagre y sal), frecuentes (tomate, pan, pepino, pimiento y cebolla) y ocasionales (huevo, almendra cruda y vino).

Al no aplicarse ningún tipo de cocción, la mezcla de vegetales del gazpacho (andaluz) no sufre alteraciones de peso asociadas a la acción del calor (que se situarían, según el método de cocción, entre un 5 y un 10 por ciento). Por la misma razón, apenas pierde valor vitamínico (las vitaminas B_1, o tiamina, y B_2, o riboflavina, se degradan en alrededor de un 15 por ciento cuando se hierven o se cuecen al vapor). Esa "no cocción" afecta, sin embargo, a la conservación de la sopa. Vale la pena, pues, centrarse en los factores que inciden en la vida útil de la preparación: la refrigeración, la acidez y la sal.

La refrigeración de un producto reduce la velocidad de las reacciones químicas y enzimáticas. Se previene así su deterioro, es decir, la pérdida de la calidad de los alimentos o de algunos de sus componentes; con todo, es imposible evitar cierta degradación vitamínica.

La refrigeración mantiene las propiedades organolépticas de los alimentos, si exceptuamos un ligero endurecimiento, causado por la solidificación de las grasas. Pero ha de tenerse en cuenta la presencia de bacterias patógenas psicrotrofas (que crecen a las temperaturas del frigorífico). Aunque se desarrollan lentamente y requieren tiempos muy largos para alcanzar contaminaciones elevadas, no dejan de constituir un problema para los alimentos que se ingieren en estado crudo. Así pues, una vez elaborado, el gazpacho debe someterse rápidamente a refrigeración y consumirse con escasa dilación.

Pese a tratarse de un producto perecedero, el gazpacho incluye en sus ingredientes compuestos con efecto conservante. Nos referimos a los ácidos y a la sal. La acidez, que en el gazpacho proviene del vinagre y del tomate, ejerce efectos antibacterianos. La sal, al estar presente en cantidad reducida, contribuye poco a la conservación.

El gazpacho corresponde a una emulsión de una fase aceitosa (aceite) con una fase acuosa (tomate, vinagre, etcétera). La manipulación de los ingredientes produce cambios en la coloración. Un gazpacho muy trabajado pierde el color rojo; la incorporación de aire lo blanquea. La trituración de las hortalizas aumenta su superficie de contacto con el oxígeno; las oxidaciones que ello produce modifican el color de los ingredientes. La consistencia de esta sopa depende de su viscosidad y de la capacidad de mantener en suspensión la porción sólida, lo que evita la separación de la pulpa y el suero.

Desde el punto de vista alimenticio, el gazpacho constituye una fuente de nutrientes, vitaminas, minerales, antioxidantes (compuestos fenólicos, carotenoides como el licopeno del tomate), fibra, compuestos antibacterianos (en el ajo), agua y grasas vegetales; además, está exento de colesterol. La conservación de sus componentes exige una manipulación fina; una mala refrigeración o un trabajo mecánico brusco deterioran y desestabilizan las vitaminas y otros nutrientes.

La energía que proporcionan 250 gramos de gazpacho andaluz corresponde a 133,5 Kcal. Se trata de un aporte calórico bajo, si lo comparamos con el contenido de la misma cantidad de leche entera (167,5 Kcal), queso emmental (418,75 Kcal), merluza (192,5 Kcal), filete de cerdo (390 Kcal), zumo de naranja o de manzana (117,5 Kcal) y zumo de piña (140 Kcal).

Se recomienda la maceración en la nevera durante unas 12 horas. En presencia de ácido, algunos componentes se ablandan; al propio tiempo, se consigue una mejor estabilización del producto.

El gazpacho más indicado para la comercialización sería el que se triturara con un aparato homogeneizador (para minimizar la incorporación de aire), se guardara en recipientes opacos (para evitar fotooxidaciones) y se envasara al vacío (para impedir oxidaciones por presencia de oxígeno). En el futuro, quién sabe si encontraremos en el supermercado gazpacho liofilizado; con el envase adecuado, constituiría un producto excelente, por su calidad organoléptica y su larga vida útil.

Pere Castells es el responsable del departamento de investigación gastronómica y científica de la Fundación Alicia.

CIENCIA 2.0

Se debate si colgar en la Red resultados experimentales provisionales, accesibles a todos, ofrece una potente herramienta de comunicación científica o supone un gran riesgo



M. MITCHELL WALDROP

La primera generación de servicios ofrecidos por la World Wide Web, o Malla Máxima Mundial, transformó con prontitud el comercio minorista y la búsqueda de información. Otros más recientes, como las bitácoras (*blogs*), las etiquetas (*tags*) y las redes sociales (*social networks*), eso que se ha dado en llamar Web 2.0, han multiplicado no menos rápidamente las opciones de los usuarios, que ahora no sólo pueden servirse de informaciones colgadas en la Red, sino también publicarlas, modificarlas y colaborar en su preparación. Ello obliga a las prácticas más tradicionales —periodismo, mercadotecnia o debate político— a adoptar formas nuevas de pensar y funcionar.

Ahora podría haberle llegado el turno a la ciencia. Un grupo de investigadores, por ahora reducido pero cada vez más numeroso, en el que participan no sólo los más jóvenes, ha empezado a difundir su trabajo a través de ventanas abiertas a la Web 2.0. Sus esfuerzos y tentativas resultan todavía demasiado dispersos para constituir un movimiento, pero la experiencia adquirida ya mueve a pensar que esta suerte de "Ciencia 2.0" basada en la Red no sólo tiene un carácter más colegiado que la ciencia tradicional sino que puede resultar más productiva.

"La ciencia no sólo es fruto de los experimentos, sino, sobre todo, del análisis y discusión de esos experimentos", explica Christopher Surridge, director editorial de "Public Library of Science On-Line Edition" (www.plosone.org), una revista difundida a través de la Red. Críticas, sugerencias, compartición de datos e ideas: tal comunicación constituye el alma de la ciencia, el más poderoso instrumento jamás ideado para eliminar errores, construir sobre la obra alzada por otros y formular nuevos conocimientos. Aunque los artículos clásicos, publicados tras revisión por expertos de igual o superior nivel, revisten suma importancia, opina Surridge, no pasan de ser meras "instantáneas" de lo que sus autores han realizado y pensado en cierto momento. Más allá de su publicación, no se prestan a ninguna elaboración cooperativa, salvo mediante procedimientos rudimentarios, como las citas o las cartas a la redacción.

En la opinión de Bill Hooker, oncólogo del Hospital infantil Shriners de Portland, las técnicas de la Web 2.0 consienten un diálogo mucho más jugoso. Hooker es autor de un estudio en tres partes sobre la creación de fuentes científicas abiertas; se ha difundido en 3 Quarks Daily (www.3quarksdaily.com), donde se mantiene una bitácora sobre ciencia y cultura. "Para mí, dejar a la vista mi cuaderno de notas de laboratorio equivale a dejar abierta una ventana para que otros vean lo que hago cada día", explica Hooker. "Supone un avance inmenso en transparencia. En un artículo impreso se expone lo que uno ha hecho. Pero no se explican los pasos que se dieron y resultaron vanos. Esos son los pequeños detalles que se aprecian al ofrecer un cuaderno de trabajo abierto [en línea] y que, en cambio, quedan en la oscuridad en todos los demás mecanismos de comunicación disponibles." Asimismo, ese aumento de eficiencia beneficiaría a la sociedad en numerosos aspectos, desde la aceleración del desarrollo de fármacos hasta el incremento de la competitividad nacional.

Numerosos científicos, desde luego, se muestran reacios a tanta apertura, sobre todo en lo que toca a las ciencias biomédicas, pues las patentes, los ascensos y los cargos profesionales dependen a menudo de ser el primero en publicar un descubrimiento. A tales profesionales, la Ciencia 2.0 les parece peligrosa. Perciben que la exposición de trabajos serios en bitácoras y redes sociales supone una clara invitación para que las notas de laboratorio se conviertan en objeto de vandalismo o, peor todavía, para que otros se apoderen de tus mejores ideas y las publiquen como suyas.



JON KRAUSE

CONCEPTOS BASICOS

- Ha nacido un nuevo sistema de trabajo científico, basado en colgar en la Red resultados experimentales "crudos", teorías en germen, supuestos descubrimientos y borradores de artículos, para que otros los vean y comenten. Se denomina Ciencia 2.0.
- Sus proponentes sostienen que, merced a este "acceso abierto", el trabajo científico se torna más cooperativo y, por tanto, más productivo.
- Los críticos aducen que, al exponer sus hallazgos preliminares, corren el riesgo de que otros copien o se aprovechen de su trabajo para adquirir méritos o reclamar patentes.
- A pesar de estos pros y contras, los sitios de Ciencia 2.0 están empezando a proliferar. Destaca el proyecto OpenWetWare, del Instituto de Tecnología de Massachusetts.

LA VOZ DE LOS LECTORES

***Scientific American*, en el espíritu de lo que se podría llamar Periodismo 2.0, publicó en su portal de la Red un borrador de este artículo, pidiendo a sus lectores que manifestasen su entusiasmo u oposición a Ciencia 2.0. Sus comentarios han contribuido a ampliar la versión definitiva; en los recuadros verdes se han tomado citas de los más sobresalientes.**

Quienes abogan por la comunicación abierta sostienen, en cambio, que la transparencia y la apertura hacen a la ciencia más productiva. En opinión de Hooker, cuando uno trabaja en línea, a "cielo abierto" por así decirlo, aprecia enseguida que ya no está compitiendo con otros científicos, sino cooperando con ellos.

Suscitar el éxito

Según Surridge, la transición a la Web 2.0 debería resultarles a los científicos completamente natural. Después de todo, desde los tiempos de Galileo y Newton, la construcción del conocimiento científico se ha basado en múltiples fuentes, las aportaciones de muchos y la depuración de saberes en debates abiertos. La Web 2.0 encaja con el funcionamiento de la ciencia. La cuestión no consiste en saber si tendrá lugar la transición, sino la rapidez con que lo hará.

Uno de los éxitos más tempranos corresponde a OpenWetWare (www.openwetware.org), del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT). El proyecto fue puesto en marcha en 2005 por estudiantes de posgrado de los laboratorios de bioingeniería de Drew Endy y Thomas Knight. En un principio, se proponían mejorar la actualización de las páginas que ambos laboratorios mantenían en la Red. OpenWetWare es una *wiki*: su elaboración es cooperativa y susceptible de modificación por cualquiera que acceda a ella. Utiliza los mismos programas que la Wikipedia, la conocida enciclopedia en línea. Los estudiantes se pusieron alegremente a colgar allí páginas propias, dándose a conocer y exponiendo sus trabajos.

No tardaron en descubrir que esa *wiki* era también un lugar adecuado para compartir lo que aprendían sobre la manipulación de ADN, los cultivos celulares y otras técnicas de laboratorio. En los laboratorios de biología, gran parte de los procedimientos experimentales se transmiten de palabra, sin que aparezca en los manuales. Jason Kelly, doctorando y miembro de la comisión directiva de OpenWetWare, explica que en su grupo carecían de esa información. La mayoría de los estudiantes procedían de la ingeniería. Eran laboratorios de principiantes, faltos de mentores. Cuando un estudiante de doctorado, o posdoctorado, lograba aplicar con éxito un protocolo nuevo, anotaba sus averiguaciones en una página de la *wiki*. Otros irían después aportando recetas o técnicas de su cosecha. "Esa información resultaba de gran utilidad a los investigadores de nuestro laboratorio", señala Reshma Shetty, doctoranda y miembro de la junta directiva, "y estaba, además, a disposición de todos, en el mundo entero".

La mayoría de los usuarios llegaron hasta OpenWetWare porque habían buscado en Google información sobre un protocolo y la habían encontrado en nuestro sitio. Al ser cada vez más quienes llegaban hasta ella, fue quedando claro que la colaboración sería beneficiosa para otras tareas; por ejemplo, la docencia. En lugar de conformarse con una página estática publicada por un profesor, los estudiantes comenzaron a crear en la Red aulas virtuales en evolución dinámica; allí colgaban resultados de laboratorio, planteaban preguntas, analizaban las respuestas y escribían ensayos en colaboración. Todo permanecía en la página del sitio, de modo que al curso siguiente la clase mejoraba. Shetty ha desarrollado una plantilla OpenWetWare para la creación de ese tipo de sitios web docentes.

Esa forma de trabajar ha beneficiado también a la gestión del laboratorio. "Yo ni siquiera sabía lo que era una *wiki*", rememora Maureen Hoatlin, de la Universidad de Ciencias y Salud de Oregón, donde dirige un grupo que estudia la anemia de Fanconi. Lo que sí sabía, en cambio, era que, debido al frenético ritmo de la investigación en su campo, le estaba resultando difícil mantenerse al corriente de lo que hacían los miembros de su propio equipo y, más todavía, de lo que se hacía en otros lugares. "Buscaba una herramienta que me ayudase a organizar tantísima información. Y que estuviese basada en la Red, porque viajo mucho y necesito acceder a esa información desde cualquier lugar. Me interesaba un formato que admitiera las aportaciones de mis colaboradores, de modo que todo cuanto se viese en esa página de la Red correspondiera a la versión más actualizada y reciente".

OpenWetWare cumplía los requisitos. Hoatlin añade: "La interacción me encanta, el hecho de que las personas de otros laboratorios puedan comentar nuestro trabajo y viceversa. No hay nada que ofrezca semejante rapidez y capacidad para hacer avanzar la ciencia."

Existe en la actualidad un amplio sector de biólogos que trabajan por medio de OpenWetWare, una web cuyo número de sitios en la Red es cada vez mayor. Hallamos un ejemplo en SyntheticBiology.org, una sede donde se exponen además ofertas y demandas de trabajo, calendarios de reuniones y congresos, debates deontológicos y muchas otras informaciones. En la actualidad, OpenWetWare abarca laboratorios de cinco continentes, cuenta con docenas de cursos y grupos de interés, y centenares de informes y debates sobre protocolos: en total, más de 6100 páginas de la Red, a las que contribuyen más de 3000 usuarios registrados. Gracias a una subvención que la Fundación Nacional de Ciencias estadouni-

El autor

M. Mitchell Waldrop es redactor de editoriales en *Nature*.



JON KRAUSE

dense les concedió en mayo de 2007, el equipo de OpenWetWare ha emprendido un proyecto de cinco años de duración, encaminado a transformar esta plataforma en una comunidad autosuficiente, que no dependa de su base actual en el MIT. La ayuda servirá también para la creación y mantenimiento de una versión genérica de OpenWetWare, adaptable a otras comunidades de investigadores.

Escepticismo

Pese al entusiasmo de los participantes, no faltan quienes ven peligrosa tan abierta aproximación a la ciencia. Al principio, tanta apertura le resultaba inquietante a la propia Hoatlin. Ahora se declara una conversa a las *wikis* abiertas para todo cuanto sea posible. Pero al principio, cuando se inscribió, quería que todo fuese de carácter reservado, debido, en parte, al temor de que algún pirata informático se colase por azar en la *wiki* e hiciera trizas o tirase a la basura sus páginas de laboratorio. No se tranquilizó hasta que comenzó a comprender las salvaguardias que incorpora el sistema.

Primero y principal, no es posible ocultarse en el anonimato. Las páginas de OpenWetWare son, en principio, visibles a todos, aunque los investigadores tienen la opción de que sus páginas sean de carácter reservado. A diferencia de la Wikipedia, que a menudo es víctima del vandalismo informático, el sistema OpenWetWare permite a los usuarios efectuar cambios sólo después de haberse registrado y demostrado que forman parte de una organización investigadora legítima. OpenWetWare no ha sufrido ni un solo caso de vandalismo. Y aunque se hubiera causado algún daño, se desharía con un clic del ratón: la *wiki* conserva de forma automática una copia de todas las páginas que se cuelgan en ella.

Con todo, una salvaguardia de esa clase poco puede hacer contra una segunda causa de preocupación: ser copiado y verse negado el mérito. “Ese es el primer argumento que se pone sobre la mesa”, dice Jean-Claude Bradley, químico de la Universidad de Drexel, que en diciembre de 2005 creó una *wiki* independiente para su laboratorio (www.usefulchem.wikispaces.com). A pesar de que los incidentes sean raros, todo el mundo ha oído alguna historia, suficiente para que la mayoría de los científicos se guarden de hablar demasiado abiertamente de los trabajos que todavía no han publicado y, mucho menos, de colgarlos en Internet.

Ello no carece de ironía, porque la Red proporciona una protección mucho más completa que el sistema de revistas tradicional. Todos los cambios de una *wiki* quedan datados al instante, por lo que si alguien tratase de aprovecharse de otro, sería muy fácil demostrar quién tiene la prioridad y poner en evidencia a quien se esté apropiando del trabajo de otro. En la opinión de Bradley, eso va a ser precisamente lo que lleve adelante la ciencia abierta: el factor miedo. Si se espera a la publicación en una revista, el trabajo tarda de seis a nueve

PERDER LA PRIMICIA

Dra. Monica: Lo primero que pensé fue que de ninguna manera iba a convertir mis reflexiones profesionales en propiedad pública. La experiencia me ha enseñado que ello no haría más que asegurar que tales ideas aparecieran más tarde en el trabajo de otros. No obstante, sí se me ocurren numerosas aplicaciones que resultarían factibles y útiles.

Funklord: La cuestión no estriba en que alguien copie nuestro trabajo y reclame el mérito para sí. El auténtico problema es: ¿Y si otros aciertan en el eureka antes que uno?

SIN REVISION EXPERTA

Darren: Uno de los aspectos más positivos del sistema actual es la revisión por expertos. Ciencia 2.0 necesita un sistema que gestione la reputación profesional, una base de datos responsable de rastrear la reputación de quienes participan en la comunidad en línea.

wilbanks: Las bitácoras y las *wikis* vienen a ser en la Red lo que las conversaciones de pasillo en los congresos o los seminarios de laboratorio, pero distan muchísimo de sustituir a las revistas profesionales. En la ciencia no se logran puntos por ser el primero en decir algo, a menos que demuestres tu afirmación.

meses en salir a la luz. En la ciencia abierta, en cambio, la prueba de prioridad está clara desde el primer momento.

En la metodología de "cuaderno abierto" que practica Bradley, de transparencia radical, todo está en línea: los protocolos experimentales, los resultados felices, los intentos fallidos e incluso los debates sobre los artículos en preparación. En su opinión, una sencilla *wiki* constituye un cuaderno de laboratorio casi perfecto. Los sellos de datación de cada entrada no sólo establecen la prioridad, sino que, además, permiten a todos el rastreo de las aportaciones individuales, incluso cuando el grupo de colaboradores es extenso.

Bradley concede que los investigadores pueden tener razones legítimas para pensárselo dos veces antes de mostrarse tan francos. En trabajos de carácter médico, en los que participan enfermos y otros probandos, debe atenderse a la privacidad. Si un científico tiene la intención de publicar en una revista que exija la titularidad de los derechos de publicación sobre textos e imágenes, la prepublicación en la Red puede suponer un problema. Y si ese trabajo puede dar pie a una patente, todavía no está claro si la oficina de patentes va a aceptar la publicación en una *wiki* como prueba de precedencia. Mientras esas cuestiones no se hayan resuelto, lo mejor será no revelar nada hasta que se haya presentado la solicitud en la oficina de patentes.

A pesar de todo, opina Bradley, cuanta mayor franqueza muestren los científicos, mejor. Cuando activó la página UsefulChem, su laboratorio estaba desarrollando fármacos para combatir la malaria y otras enfermedades. Dado que los motores de búsqueda indexaban esa página sin necesidad de contraseñas, se encontraron de pronto con que mucha gente les había descubierto a través de Google y estaba deseosa de colaborar. El Instituto Nacional del Cáncer estadounidense se puso en contacto con ellos, con el propósito de ensayar la función antitumoral de sus compuestos. Rajarshi Guha, de la Universidad de Indiana, se ofreció a ayudarles en los cálculos de acoplamiento molecular (*docking*), que determinan la reactividad química. En la actualidad han pasado de un laboratorio que investiga a una red de laboratorios que colaboran entre sí.

Blogofobia

Aunque las *wikis* estén ganando adeptos, los científicos se han mostrado notoriamente remisos a sumarse a una de las aplicaciones más populares de la Web 2.0: las bitácoras en la Red o *blogs*.

"Es la antítesis de la formación que han recibido", afirmaba Huntington F. Willard, genetista de la Universidad Duke, en uno de los primeros simposios dedicados a este tema, celebrado en enero de 2007. Todo el propósito de las bitácoras consiste en sacar a la luz ideas "frescas", incluso a riesgo de que sean erróneas o incompletas. "Mas para un científico, un salto de tal naturaleza es muy arriesgado", opina Willard. Antes de

CORRUPCION DE ENLACES

ScienceEditor: Las citas en Internet no suelen estar bien vistas por autores y editores. La corrupción de enlaces garantiza que cualquier dirección citada en la Red acabe siendo un "404" [error: página inexistente] antes de diez o doce años. Autores, redactores y editores deberían mantener un sistema como WebCite (www.webcitation.org) para archivar material de Internet no publicado en revistas, que asegurara la accesibilidad a largo plazo de los registros.

MAYOR TRANSPARENCIA

Deadlyvices: La Web 2.0 ofrece una oportunidad fantástica para abrir la ciencia a todos, no sólo a los profesionales en nómina. Si los profanos inteligentes tuvieran mayor oportunidad de hacer aportaciones, el desafecto público hacia la ciencia quizá sería menor.

Richaa: Una de las razones de que abandonase la ciencia tras doctorarme fue su querencia aislacionista. Un científico opinó que me interesaban demasiadas cosas para tener éxito en la investigación en física. Decidí tomarlo como un cumplido. Tengo la esperanza de que la apertura de la ciencia mediante las técnicas de la Web 2.0 contribuirá a eliminar esos prejuicios y a introducir la colaboración y el valioso pensamiento interdisciplinario.


JON KRAUSE

publicar un resultado y darlo a conocer, se desarrolla un largo proceso de preparación del artículo y de revisión por pares. Cada palabra ha sido cuidadosamente elegida, porque va a permanecer allí para siempre. Nadie desea leer, "Contrariamente al resultado de Willard y colaboradores...".

Con todo, H. F. Willard sí está a favor de las bitácoras. Ha sido autor de numerosos artículos de opinión en los periódicos; considera que los científicos han de tener voz en todos los medios de comunicación que actúen de forma responsable. Dado que casi todas las bitácoras permiten que los lectores comenten las notas colgadas en ellas, ha resultado ser un buen medio para el debate y la "lluvia de ideas". Tenemos un ejemplo en la bitácora de Bradley, UsefulChem, y en Chembark (www.blog.chembark.com). "Chembark se ha convertido en una suerte de 'cafetería', donde todo el mundo opina libremente sobre química", afirma Paul Bracher, que está realizando su tesis doctoral en la Universidad de Harvard. "Los temas de conversación son del tipo: ¿Qué proyectos deberían financiar las agencias de investigación? ¿Cuál es la mejor forma de gestionar un laboratorio? ¿Qué clase de comportamientos admira usted en un jefe? Pero en vez de un grupo de cuatro o cinco personas que han coincidido en la barra, se cuentan por centenares y de todas las partes del mundo."

Desde luego, muchos de los miembros del público de Bracher (científicos jóvenes que luchan por hacerse con un puesto) ven esas discusiones como un campo de minas. Un buen número de los participantes en su bitácora recurren a pseudónimos, por temor a que un comentario pueda molestar a algún profesor y merme las posibilidades del estudiante para lograr una plaza en el futuro. Otros participantes potenciales prefieren no implicarse, porque juzgan que el tiempo dedicado a la comunidad de la Red es tiempo que pierden en la preparación de su próxima publicación. "La piedra angular de los ascensos y los empleos sigue siendo el artículo revisado por pares", dice Surridge, de PLoS ONE. "Los científicos no publican en bitácoras porque con ello no obtienen reconocimiento ni prestigio."

El problema del reconocimiento de méritos constituye una de las grandes barreras para Ciencia 2.0. Así lo piensa Timo Hannay, director de publicaciones en la Red del grupo editorial *Nature*, de Londres. Sin embargo, una vez más, la propia técnica puede ser de gran ayuda. Todo el mundo sabe que la contribución de los científicos va más allá de los artículos que publican. Los buenos científicos pronuncian conferencias en congresos, comparten ideas y desempeñan un liderazgo en su comunidad. Lo que ocurre es que las publicaciones han sido siempre el único aspecto mensurable. Ahora, conforme vaya estando en línea una mayor parte de esa comunicación informal, también resultará más fácil su medición.

El rendimiento de la colaboración

La aceptación de tales medidas exigirá un cambio radical en la vida académica. Mas para los defensores de Ciencia 2.0, lo importante es que la técnica ofrece la posibilidad de aliviar en los investigadores las obsesiones de prioridad y publicación, y les aproximará al tipo de apertura y sentimiento de saber compartido que en tiempos se consideraron emblemáticos de la ciencia. "No creo que vaya a desaparecer el artículo formal de investigación", opina Surridge. "En cambio, crecerá una actividad en colaboración que se concretará en publicaciones." Y en la pospublicación: PLoS ONE permite a sus usuarios no sólo anotar y comentar los artículos que publica en línea, sino también valorar la calidad de los mismos en una escala de 1 a 5.

Quizá se añadan a la iniciativa algunas universidades. El claustro de la Facultad de Artes y Ciencias de Harvard, en una votación crucial, aprobó en febrero pasado un sistema por el cual se publicarían en un repositorio en línea los artículos terminados, para ponerlos libremente al alcance de todos. Los autores conservarían los derechos para su publicación en revistas tradicionales.

En el ínterin, Hannay ha ido introduciendo el grupo de *Nature* en el mundo de la Web 2.0. "Nuestra auténtica función no consiste en publicar revistas, sino en facilitar la comunicación científica", declara. Entre sus diversos empeños se cuentan Nature Network, una red social para científicos; Connotea, una sede de referencias de investigación que toma por modelo al popular del.icio.us; y Nature Precedings, donde los investigadores pueden comentar manuscritos aún no publicados, presentaciones y otros documentos.

De hecho, sostiene Bora Zivkovic, experto en ritmos circadianos y responsable de la comunidad en línea de PLoS ONE, los diversos experimentos de Ciencia 2.0 están proliferando con tal celeridad, que resulta casi imposible seguirles la pista. "Se trata de un proceso darwinista", explica. "Alrededor del 99 por ciento de las ideas van a morir. Otras, en cambio, surgirán y prosperarán."

"No quisiera profetizar hacia dónde se encamina todo esto", añade Hooker, "pero apuesto a que cuando lleguemos nos va a gustar".

GEMAS ENTRE LAS BARREDURAS

Matthewdsmith: Es posible que al poner tantísima información a la vista (imaginemos millones de páginas de libros de notas, con sus detritus y pecios diversos a la deriva) resulte más difícil todavía encontrar la información verdaderamente valiosa.

jasonkelly: Existen multitud de recursos (Google, por ejemplo) que abordan el problema de buscar en conjuntos enormes de informaciones diversas; podemos, pues, surfear gratis en esa ola.

Cameron Neylon: El filtrado automático y cooperativo aumentaría la eficacia de Ciencia 2.0. Facebook y Amazon realizan un excelente trabajo en la identificación de personas que conozco o de libros que me interesan. El problema estriba en construir redes científicas de dimensión suficiente, que permitan empezar a cosechar beneficios.

Bibliografía complementaria

COMPUTER SCIENCE: SCIENCE 2.0. Ben Schneiderman en *Science*, vol. 319, págs. 1349-1350; 7 de marzo, 2008.

THE FUTURE OF SCIENCE IS OPEN. Bill Hooker. A three-part review of open-access science: www.3quarksdaily.blogs.com/3quarksdaily/2006/10/the_future_of_s_1.html

NATURE NETWORK, una red en línea donde hablar de noticias y acontecimientos científicos: http://network.nature.com

SCIENCE COMMONS, un proyecto "en línea" orientado a facilitar libre acceso a ciencia en la Red: www.sciencecommons.org

Autofagia

Proteínas erosionadas, orgánulos averiados y microorganismos invasores, todos son absorbidos por diminutas "aspiradoras" celulares. Si se mantuviera operativo, ese mecanismo retrasaría el envejecimiento

Vojo Deretic y Daniel J. Klionsky

CONCEPTOS BASICOS

- Los autofagosomas engullen constantemente porciones del citoplasma, junto con componentes celulares dañados y virus o bacterias invasores. La "basura" se transporta hasta orgánulos digestivos para su descomposición y reciclaje.
- Los biólogos celulares están ahondando en ese proceso autofágico mediante el seguimiento de las señales proteicas que lo dirigen y controlan.
- Un mayor conocimiento de la autofagia abre nuevas vías para el tratamiento del cáncer, enfermedades infecciosas, trastornos inmunitarios y demencia. Algún día ayudará a retrasar el envejecimiento.

De vez en cuando, se descubre que un proceso celular considerado de poco valor y confuso corresponde, en realidad, a una actividad fundamental. Un proceso que interviene, ubicuo, en una amplia gama de estados normales y patológicos. Así aconteció con la función que desempeña el óxido nítrico en el sistema circulatorio, un hallazgo que mereció el premio Nobel y que ha contribuido al desarrollo de múltiples fármacos. Ahora, otro de esos procesos poco conocidos ha empezado a despertar el interés entre los biólogos: la autofagia.

La autofagia (de "auto-devorarse", en griego) responde a un esquema sencillo. En el interior de cada célula, en torno al núcleo, se encuentra el citoplasma, una suerte de gelatina amorfa que se sustenta gracias a una matriz esquelética y en la que se hallan en suspensión una vasta y compleja población de macromoléculas y una serie de subunidades funcionales especializadas, los orgánulos. El funcionamiento del citoplasma es tan complejo (podríamos equipararlo al del sistema operativo de un ordenador), que se atasca constantemente con los detritus de las actividades que se llevan a cabo. El sistema autofágico opera, en parte, como un mecanismo de limpieza: un cubo de basura que va de un sitio a otro para recoger fragmentos viejos de proteínas y otros restos indeseados que se acumulan en el citoplasma.

El saneamiento del citoplasma da nueva vida a cualquier célula, pero reviste particular interés en el caso de las neuronas, por tratarse de células que no se reemplazan. Una neurona que deba vivir tanto tiempo como el organismo que la alberga apenas si dispone de otro medio de renovar y mantener sus funciones. La autofagia opera también como un mecanismo de defensa frente a virus y bacterias patógenas. Cualquier objeto extraño u organismo que burle el sistema inmunitario extracelular, y consiga atravesar la membrana celular para llegar al citoplasma, se convierte en un objetivo potencial para el sistema autofágico.

Del mismo modo, cuando la autofagia opera con excesiva lentitud, celeridad desmesurada o con cualquier otra disfunción, las consecuencias son graves. Muchos de los millones de personas que padecen la enfermedad de Crohn, un trastorno inflamatorio de los intestinos, pueden presentar sistemas de autofagia defectuosos, que no logran evitar el crecimiento descontrolado de la flora microbiana intestinal. La enfermedad de Alzheimer y el envejecimiento se han relacionado con una disfunción del sistema autofágico en las neuronas del cerebro.

Un sistema de autofagia en perfecto estado puede resultar perjudicial, si permite que una célula cancerosa sometida a tratamiento (radioterapia o quimioterapia) sobreviva y se recomponga por sí misma, propagando el cáncer. En ocasiones, por el bien del organismo, el sistema autofágico elimina una célula enferma. Pero puede también devorar una célula aunque la pérdida de esta célula resulte perjudicial.

Durante el último decenio, se ha ahondado en el funcionamiento del sistema autofágico. Ello no sólo arroja luz sobre el funcionamiento de las células, sino que abre, además, vías al diseño de fármacos que induzcan la activación o desactivación del sistema, según las necesidades. Mediante el control de la velocidad del proceso y los objetivos de su actividad se obtendrían enormes beneficios terapéuticos y quizá se aliviaría parte del deterioro de las

funciones cerebrales que padecen las personas conforme envejecen.

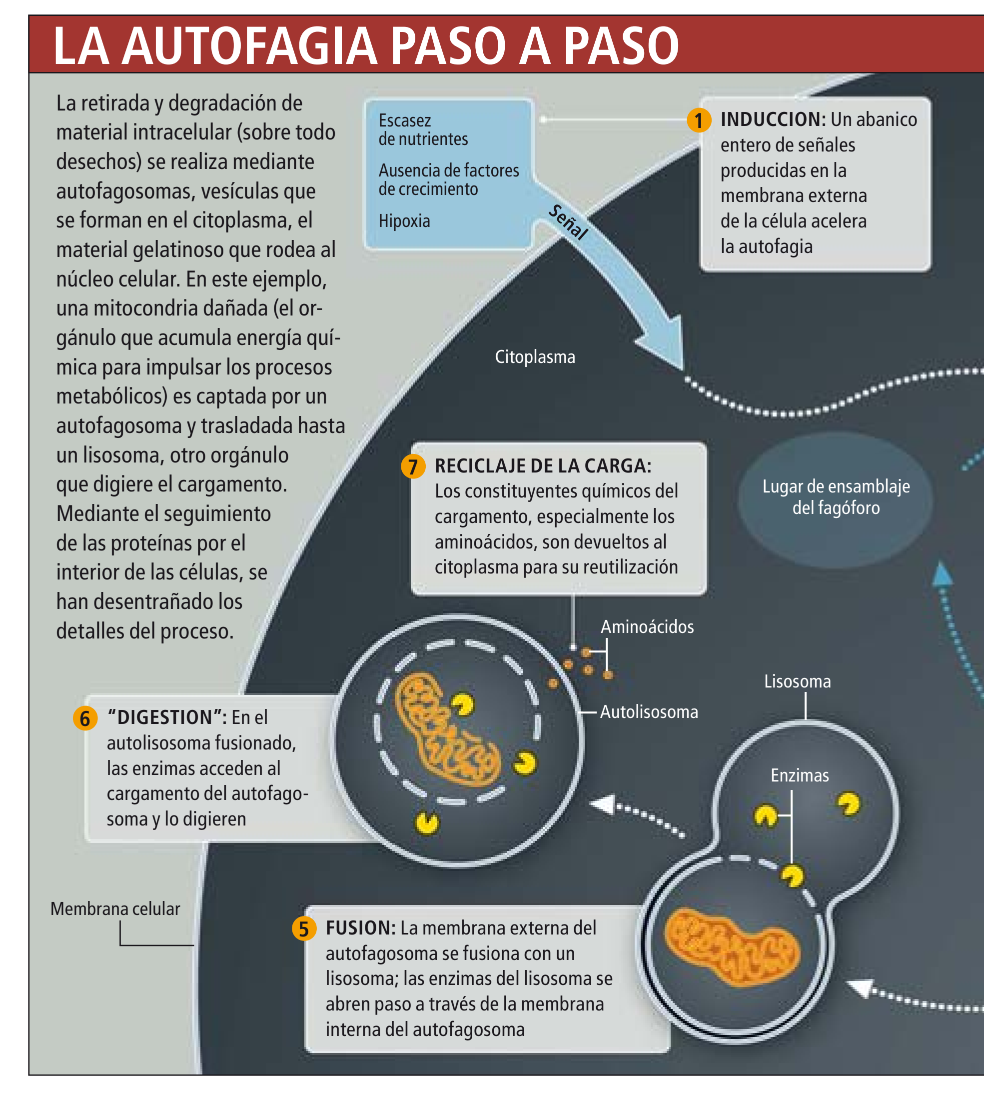
De brigada de rescate a servicio de limpieza

Se utiliza el término "autofagia" para definir varios procesos relacionados. Aquí nos referimos a la "macroautofagia", el mecanismo de limpieza que ha recibido mayor atención de los investigadores. El proceso comienza cuando varias proteínas y lípidos (grasas) del citoplasma forman unas láminas que constan de dos membranas superpuestas. Esas membranas se curvan sobre sí mismas para formar un glóbulo abierto por un extremo, que engulle porciones del citoplasma con todo lo que puedan contener.

A continuación, el glóbulo, o fagóforo, se cierra dando lugar a una vesícula cerrada, el autofagosoma. El autofagosoma suele transportar su contenido hasta un lisosoma, una suerte de planta de tratamiento alojada en otro lugar del citoplasma. Los dos orgánulos se fusionan y crean un "autolisosoma"; allí los autofagosomas vierten su cargamento a los "jugos digestivos" del lisosoma. Los fragmentos moleculares útiles que quedan después de la digestión se envían de vuelta al citoplasma para ser reciclados.



ADAM QUESTELL



En líneas generales, ese proceso se conoce desde los años sesenta del siglo pasado, cuando Christian de Duve, de la Universidad Rockefeller, y otros lo estudiaron por microscopía electrónica. Hace diez años, uno de los autores (Klionsky) y otros (el grupo de Yoshinori Ohsumi, del Instituto Nacional de Biología Básica de Okazaki) comenzaron a investigar la biología molecular del sistema autofágico en levaduras, donde el estudio de esa función resulta mucho más fácil que en animales superiores.

Mereced al trabajo investigador han ido descubriéndose múltiples detalles de la maquinaria autofágica, de suyo difíciles de observar. Muchas de las proteínas que intervienen en la autofagia o que la regulan han sufrido sólo ligeros cambios durante la evolución y son, por tanto, idénticas a sus homólogas humanas.

La autofagia podría haber surgido en respuesta a la inanición celular, como un rudimentario mecanismo de defensa inmunitaria o ambas cosas. Para darnos cuenta de la necesidad de reaccionar ante la inanición, pensemos en lo que ocurriría si a un organismo se le privara de alimento. Si una persona limita su ingesta alimenticia, el cuerpo no deja de funcionar y se muere, sino que comienza a metabolizar sus propias reservas nutricionales. Los adipocitos son los primeros en ser consumidos; les llega luego el turno incluso a los miocitos, que se degradan para alimentar la llama metabólica que mantiene en funcionamiento los procesos esenciales.

De forma análoga, cuando las células están privadas de alimento metabolizan partes de sí mismas para mantener sus funciones básicas. La actividad de los autofagosomas es constante: engullen porciones del citoplasma, esté o no la célula en condiciones de ayuno, renovando sin cesar la mayor parte de los contenidos del citoplasma. Pero hay varios tipos de estrés (inanición, hipoxia o ausencia de factores de crecimiento, por citar algunos) que proporcionan una señal para que la célula acelere el ensamblaje de sus autofagosomas. La escasez de nutrientes intensifica, por tanto, la autofagia. Los autofagosomas hurgan en el citoplasma en busca de proteínas y orgánulos (con independencia de su estado de funcionamiento) que puedan ser digeridos para aprovechar los nutrientes y energía en el consumo celular.

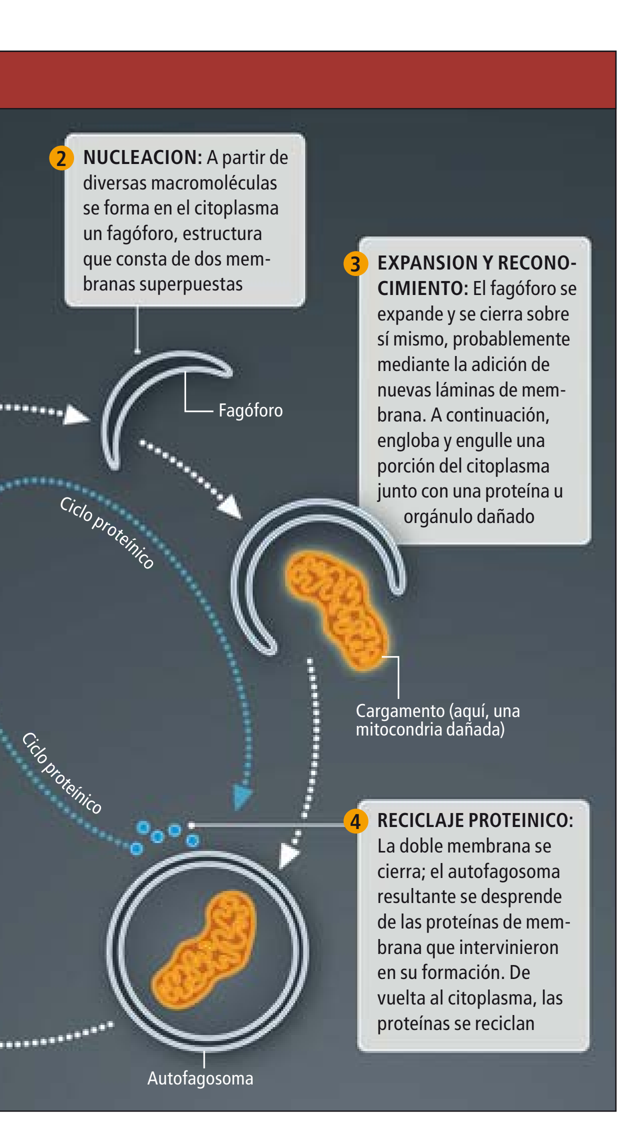
Amén de la función "alimenticia", la autofagia desarrolla —incluso cuando hay nutrientes en abundancia— funciones de mantenimiento primordiales para la célula. Los autofagosomas ayudan a que la célula se libre de intrusos indeseados. Las proteínas que realizan el trabajo celular en ocasiones se ensamblan de forma incorrecta y con el tiempo se "desgastan". Se convierten entonces en proteínas disfuncionales o, lo que es peor, aberrantes. Llegadas a ese extremo, deben retirarse antes de convertirse en un problema. El incesante aparato autofágico mantiene a raya las concentraciones de las moléculas averiadas.

Los autofagosomas no se limitan a retirar proteínas inservibles. Buscan y atrapan orgánulos dañados de un tamaño mayor. Las mitocondrias, por ejemplo, son los orgánulos encargados de generar energía en el interior de la célula; además, mandan señales a otras partes de la célula para que inicien la apoptosis (suicidio celular).

Las células inducen la apoptosis por varias razones, todas en pro del bien del organismo. El cuerpo genera continuamente más células de las que necesita, por lo que deben ser eliminadas. Una célula envejecida que ha dejado de funcionar puede suicidarse para dejar sitio a las más jóvenes y robustas. También puede promoverse el

EL AUTOFAGOSOMA, rodeado de una doble membrana, ha engullido una mitocondria (*región oscura*). La imagen se ha aumentado 35.000 veces.

EEVA-LIISA ESKELINEN (*micrografía electrónica*)



JEN CHRISTIANSEN

suicidio de una célula cuyo crecimiento ha degenerado en una proliferación cancerosa; por esa vía se convierte la apoptosis en una de las principales barreras intrínsecas contra el cáncer. La apoptosis depende de una compleja serie de eventos celulares, rigurosamente orquestados mediante múltiples señales proteínicas. La muerte celular por apoptosis se considera un suceso programado.

Una mitocondria defectuosa puede causar estragos si activa la apoptosis en el momento equivocado. Entre los subproductos de la actividad mitocondrial se encuentran las especies reactivas del oxígeno (ERO): iones oxígeno y otros fragmentos moleculares basados en el oxígeno. Con frecuencia, el uso de esas sustancias volátiles hace que escape de la mitocondria parte de su contenido, incluidas las proteínas que constituyen la señal de inicio de la apoptosis. En otras palabras, un fallo menor en una fracción celular conduce, de forma involuntaria, a la muerte de la célula entera. Si esa muerte accidental afecta a unas pocas células de la piel, el suceso reviste escasa importancia, pero si afecta a neuronas cerebrales de la memoria, se convertirá en fuente de problemas.

La autofagia opera como un mecanismo de seguridad frente a ese tipo de errores destructivos. Los autofagosomas retiran del citoplasma las mitocondrias dañadas y otros orgánulos; se aseguran de que sean destruidos por enzimas lisosómicas en un autolisosoma, antes de que induzcan una muerte celular no programada o, lo que es peor, el fallecimiento celular indiscriminado que denominamos necrosis.

Las mitocondrias liberan también al citoplasma ERO, que, como su nombre indica, tienden a reaccionar con numerosas moléculas. En una célula sana, los niveles de ERO se mantienen bajo control por medio de moléculas antioxidantes que reaccionan con las ERO. Sin embargo, según Shengkan V. Jin, de la Universidad de Medicina y Odontología de Nueva Jersey, cuando las mitocondrias resultan dañadas, inundan la célula con escapes de ERO 10 veces más intensos de lo habitual, mucho más de lo que pueden asumir los sistemas de desintoxicación celular.

La liberación de cantidades tan grandes de ERO supone un riesgo de contraer cáncer, porque las ERO que alcancen el núcleo pueden inducir alteraciones génicas malignas. De nuevo, la autofagia viene al rescate, eliminando de la célula las mitocondrias que no funcionen bien. Eileen White, de la Universidad Rutgers, cree que la autofagia mitiga el daño génico en las células cancerosas y, con ello, evita la formación de nuevos tumores.

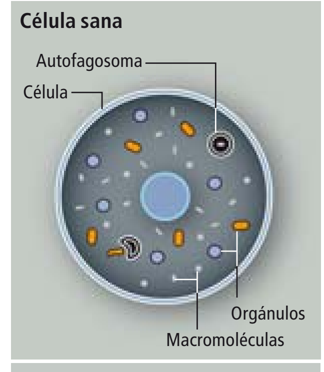
Un arma de doble filo

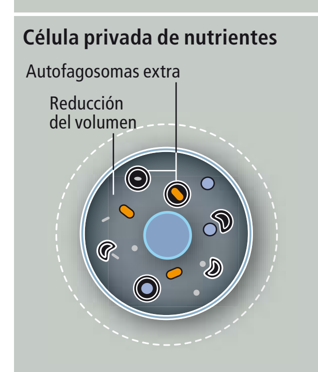
Poco después de revelarse los mecanismos moleculares de la apoptosis, los biólogos se percataron de que las células contaba con otras estrategias suicidas. La autofagia se convirtió en el principal sospechoso. La nomenclatura actual refleja esa historia: a la apoptosis se la denomina "muerte celular programada de tipo I" y, la autofagia, "muerte celular programada de tipo II".

La autofagia conduciría a la muerte celular a través de dos vías: mediante la digestión del citoplasma hasta que la célula muera o mediante la activación de la apoptosis. Mas, ¿por qué, para provocar la muerte de la propia célula, se habría de recurrir a un proceso que con frecuencia evita la muerte celular prematura por apoptosis accidental? Parece que la apoptosis y la autofagia estarían estrechamente interrelacionadas y sujetas a una regulación sutil. Si los daños en los orgánulos son demasiado extensos y la autofagia no los mantiene bajo control, la célula debe morir por el bien del organismo entero. Llegados a ese punto, la célula puede

SOBREVIVIR A LA INANICION

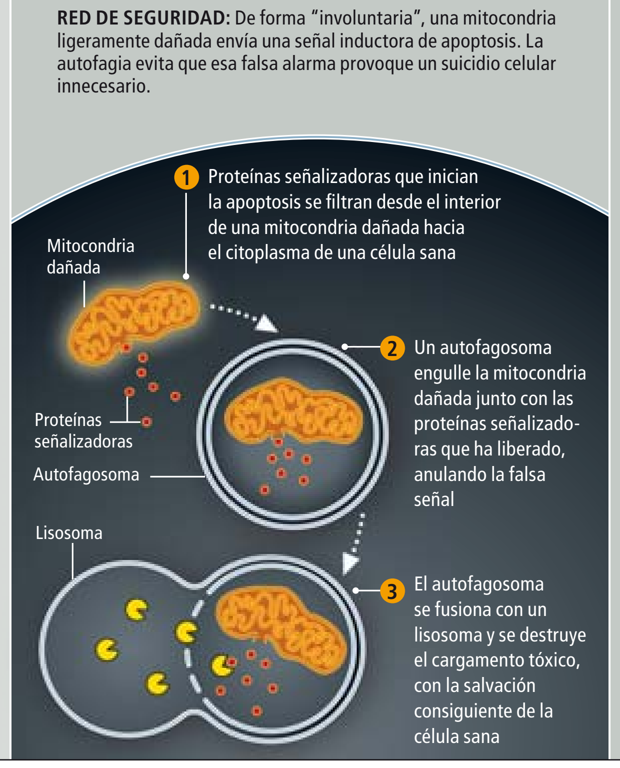
Los autofagosomas consumen sin cesar porciones del citoplasma. Con la escasez de nutrientes aumenta el número de autofagosomas, fenómeno que acelera la velocidad a la que los componentes intracelulares (proteínas enteras y otras macromoléculas) son digeridos por los autolisosomas para formar los constituyentes bioquímicos básicos que se liberan al citoplasma constituidos en nutrientes. La escasez de nutrientes provoca también la reducción del volumen funcional de la célula. Sin esa actividad "auto-devoradora", la célula no podría seguir realizando sus funciones básicas y moriría.





¿HACER VIVIR O DEJAR MORIR?

La última acción de una célula gravemente dañada puede ser el desencadenamiento de su propia muerte por el bien del organismo. La apoptosis, una ruta suicida, comienza cuando las mitocondrias del citoplasma liberan proteínas señalizadoras. Se ha sugerido que la autofagia salva a la célula de una apoptosis innecesaria (*centro*). Paradójicamente, la autofagia puede también constituir una segunda forma de suicidio cuando la muerte de la célula resulta necesaria y fracasa la apoptosis (*derecha*). Además, la apoptosis y la autofagia comparten ciertas proteínas señalizadoras, lo que sugiere que los dos procesos mantienen un diálogo; deberían, en efecto, considerarse componentes de un sistema intracelular más amplio.



LA DECISION FINAL: En una célula gravemente dañada, el sistema que desencadena el suicidio celular responde de forma dinámica a las señales de estrés. La autofagia puede tomar varios rumbos: ralentizarse (entonces la célula sobrevive), seguir devorando la célula desde el interior hasta que muera, iniciar las señales inductoras del suicidio celular por apoptosis (*no se muestra*) o, si la apoptosis falla, operar como un segundo mecanismo de suicidio para evitar la muerte celular indiscriminada, o necrosis (*no se muestra*).

Inanición
Hipoxia
Núcleo
Ausencia de factores de crecimiento
Célula gravemente dañada
Autofagosoma
La célula muere
La célula sobrevive

recurrir a cualquiera de sus dos programas de suicidio: permitir que la autofagia continúe hasta el final o iniciar la señal de apoptosis y retener la autofagia como un sistema de reserva por si la apoptosis se encuentra comprometida. Dos de las áreas de investigación actuales más activas —y polémicas— se centran en la interconexión entre la autofagia y la apoptosis, y en si la autofagia debería considerarse un mecanismo de muerte celular.

Quizá los estudios moleculares ayuden a resolver la cuestión de si la autofagia corresponde, de preferencia, a un mecanismo de supervivencia o si opera como un "ángel de la muerte". La investigación reciente de Beth Levine, del Hospital Southwestern de la Universidad de Texas en Dallas, y Guido Kroemer, del Centro Nacional de Investigación Científica galo (CNRS), han mostrado el modo en que se coordinan ambos procesos. Una de las proteínas que da la señal para que comience la autofagia, Beclin 1, se une a una proteína que evita el inicio de la apoptosis, Bcl-2.

Las decisiones de "vida o muerte" se toman en función de que se intensifiquen o se rompan los enlaces entre las dos proteínas. Los descubrimientos de Levine sobre la conexión entre la autofagia y la apoptosis se han visto respaldados por otro hallazgo. Se ha descubierto que un fragmento de la proteína Atg5 (que desempeña un papel destacado en la formación de los autofagosomas) accede por sus propios medios a las mitocondrias; una vez allí, Atg5 convierte en una respuesta apoptótica lo que en un principio era una respuesta autofágica.

Toda ventaja parece tener algún contratiempo. La autofagia no es una excepción. Se indicó más arriba que las células cancerosas inducían a veces la autofagia para salvarse. Con frecuencia, las terapias contra el cáncer se proponen inducir el suicidio de las células malignas. Sin embargo, algunas células cancerosas eluden los tratamientos porque la autofagia retira las mitocondrias dañadas antes de que desencadenen la apoptosis. De hecho, la radiación y la quimioterapia inducen niveles de autofagia superiores a los normales.

Las células cancerosas recurren a la autofagia para evitar la muerte por inanición. Son pocos los nutrientes que alcanzan el interior de un tumor. Pero una escasez de nutrientes desencadena la autofagia y, con ello, prolongar la vida de la célula cancerosa al permitirle alimentarse de sus propias macromoléculas degradadas. Por tanto, un posible tratamiento consistiría en suprimir la autofagia en el interior de un tumor o durante la terapia de radiaciones o fármacos. Se han emprendido ya ensayos clínicos con medicamentos que persiguen ese objetivo. Por desgracia, tal y como señala White, la supresión de la autofagia podría incrementar el número de mutaciones génicas en las células cancerosas, lo que aumentaría la probabilidad

JEN CHRISTIANSEN

de recidiva. Deberán realizarse algunos ajustes para que el tratamiento resulte eficaz.

Evitar el deterioro neuronal

A la vista de la función que desempeña la autofagia en el mantenimiento del citoplasma libre de detritus y componentes averiados, no es de extrañar la importancia del proceso para el bienestar de las células longevas, como las neuronas. Una autofagia ineficaz resulta crucial en trastornos neurodegenerativos: enfermedad de Alzheimer, enfermedad de Parkinson y enfermedad de Huntington. Las tres provocan cambios, aunque lentos, inexorables en el cerebro. La enfermedad de Alzheimer, una forma de demencia que sólo en los EE.UU. afecta a 4 millones y medio de personas, es la más común.

Consecuencia habitual del envejecimiento es la acumulación, en el soma de las células cerebrales, de lipofucsina, una sustancia marrón, mezcla de lípidos y proteínas. Según Ralph A. Nixon, del Instituto Nathan S. Kline de Investigaciones Psiquiátricas, la acumulación de marras constituye un síntoma de que las células cerebrales envejecidas no pueden retirar las proteínas aberrantes con la velocidad a la que se acumulan.

En los pacientes de alzheimer se acumula en el interior de las neuritas un pigmento amarillento o marrón denominado ceroide. Esas prolongaciones del soma se hinchan allí por la zona de acumulación del ceroide; en el exterior de las neuritas hinchadas se forman las placas amiloides, o seniles, características de la enfermedad.

Hasta la fecha, se desconocen los mecanismos en cuya virtud las placas seniles o sus precursores instan el deterioro neuronal. Pero la investigación reciente demuestra que, en determinadas formas precoces de alzheimer, las enzimas que favorecen la deposición de las placas se encuentran en las membranas de los autofagosomas. Según Nixon, esas placas pueden proceder, en parte, de una autofagia incompleta y la subsiguiente incapacidad de las neuronas para digerir sustancias que en condiciones normales serían retiradas de su citoplasma, destruidas y recicladas por partes. Las micrografías electrónicas de placas seniles en cerebros de pacientes con alzheimer confirman la conclusión de Nixon: muestran un gran número de autofagosomas inmaduros acumulados en el interior de las regiones neuronales más cercanas a las placas. Ignoramos el mecanismo de acumulación del material de la placa en el exterior de las neuronas.

Ante tales resultados, diríase que cualquier factor que promueva la autofagia debería demorar la aparición de los debilitantes síntomas del alzheimer. Desgraciadamente, sin embargo, nadie sabe todavía si la activación de la autofagia en pacientes con alzheimer resultaría beneficiosa si no se garantiza también que los autofagosomas se fusionen con los lisosomas.

Pero no todo son malas noticias. Ese tipo de tratamiento podría resultar eficaz en los pacientes con huntington. La rapamicina (o sirolimus), un inmunosupresor que se utiliza para bloquear el rechazo de los órganos trasplantados, riñón sobre todo, induce autofagia. Han comenzado ya los ensayos de la eficacia de la rapamicina en la estimulación de la autofagia para que elimine un agregado proteico observado en pacientes con huntington.

Eliminación de microorganismos

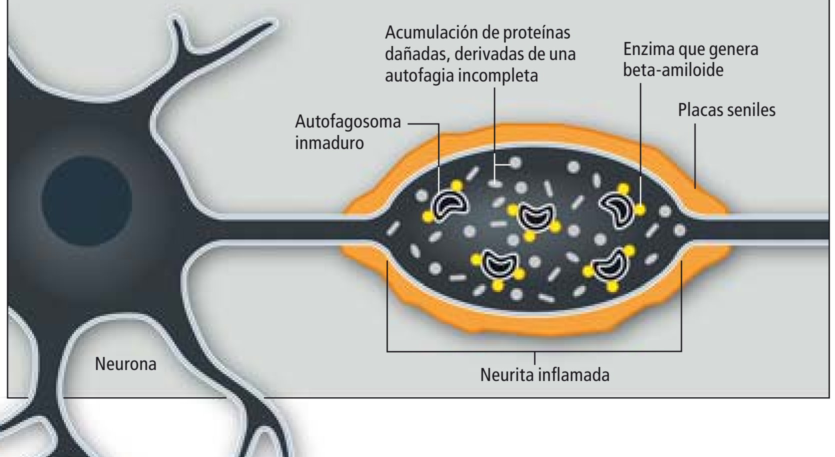
Si un autofagosoma captura y destruye una mitocondria cuyo comportamiento pueda poner en peligro a la célula, ¿no podría hacer lo mismo con bacterias, protozoos y virus invasores que atraviesen la membrana celular? En fecha reciente, se ha sometido a contrastación empírica esa hipótesis. El trabajo de uno de los autores (Deretic) y de otros dos grupos japoneses, uno encabezado por Tamotsu Yoshimori, de la Universidad de Osaka, y el otro por Chihiro Sasakawa, de la Universidad de Tokio, han demostrado, de forma conjunta, que la autofagia elimina un amplio espectro de patógenos. La lista incluye *Mycobacterium tuberculosis*, la bacteria de la tuberculosis que cada año mata dos millones de personas en todo el mundo; patógenos intestinales como *Shigella* y *Salmonella*; estreptococos del gru-

Los autores

Vojo Deretic es profesor y director del departamento de genética molecular y microbiología del Centro para las Ciencias de la Salud de la Universidad de Nuevo México. Realizó sus estudios en Belgrado, París y Chicago. **Daniel J. Klionski** ocupa la cátedra Alexander G. Ruthven de Ciencias de la Vida en el Instituto de Ciencias de la Vida de la Universidad de Michigan. Es director editorial de la revista *Autophagy*.

CUANDO SE DETIENE LA LIMPIEZA

En una neurona cerebral envejecida, los autofagosomas fallan y no completan su desarrollo. Se acumulan proteínas dañadas y se inflama la neurita (prolongación que emerge del soma neuronal). Los autofagosomas inmaduros se agrupan en el mismo sitio. Las enzimas (*amarillo*) que originan fragmentos proteicos beta-amiloides parecen concentrarse sobre los autofagosomas inmaduros; esos fragmentos se acumulan en la superficie externa de la neurita (*naranja*). Los agregados de beta-amiloides forman las placas seniles características de las neuronas cerebrales de pacientes con alzheimer. Semejante cuadro nos evoca una disfunción de la autofagia que puede contribuir al alzheimer.



JEN CHRISTIANSEN

po A; *Listeria*, que aparece en quesos elaborados a partir de leche cruda; *Francisella tularensis*, incluida por el Centro estadounidense para el Control y Prevención de Enfermedades en la lista de agentes bioterroristas; y *Toxoplasma gondii*, uno de los principales parásitos causantes de enfermedades en pacientes de sida.

Sin embargo, lo mismo que las células cancerosas se aprovechan de la autofagia para su propia supervivencia, algunos microorganismos han desarrollado formas de subvertir el proceso. *Legionella pneumophila*, la bacteria que provoca legionelosis, accede fácilmente al interior celular; pero si es engullida por un autofagosoma, retrasa o evita que éste se fusione con un lisosoma. Así, en lugar de ayudar a la célula a librarse del patógeno, el orgánulo infectado se convierte en un nicho donde la bacteria se replica, utilizando el citoplasma secuestrado como fuente de nutrientes.

La propia existencia de esas astutas estrategias evolutivas constituye una prueba de que la autofagia viene operando desde hace tiempo como una de las principales barreras frente a la invasión y replicación de patógenos en células humanas. El VIH ofrece otro ejemplo de patógeno que saca provecho de la autofagia. Dos grupos franceses, uno encabezado por Martine Biard-Piechaczyk, del Centro de Estudios de Agentes Patógenos y Biotecnologías para la Salud, y el otro por Patrice Codogno, del Instituto Nacional de la Salud y la Investigación Médica, han demostrado conjuntamente que el VIH, que infecta a las células T CD4+ inmunitarias, aumenta la muerte de otras células del mismo tipo que no estaban infectadas, pero "que pasaban por allí". Cuando el VIH se introduce en una célula, se desprende de su cápside; la proteína que constituye esa envoltura induce una autofagia excesiva e incontrolada, y, a continuación, la apoptosis de las células que rodean a la célula infectada por el VIH. De ese modo, al activar la autofagia en inocentes células "transeúntes", el VIH rebaja todavía más el número de células T CD4+ sanas en el organismo. En última instancia, la desastrosa pérdida de células inmunitarias genera un sida explosivo.

La conexión inmunitaria

La autofagia no sólo participa en la eliminación directa de los patógenos. Interviene también en la respuesta inmunitaria. Los autofagosomas ayudan a presentar patógenos o productos de los patógenos a los receptores de tipo Toll (TLR, de "Toll like receptors"), ciertas moléculas de membrana que controlan la respuesta inmunitaria innata. La función de los autofagosomas consiste en realizar una astuta inversión "topológica". Un patógeno que se halle en el citoplasma puede esconderse de los TLR porque los lugares de unión a patógenos en los TLR están orientados hacia el lado contrario al citoplasma. Los lugares de unión apuntan hacia el medio externo de la célula o hacia el interior de un endosoma (un compartimento intracelular). Para resolver ese problema topológico, los autofagosomas recogen patógenos o partes de ellos del citoplasma y los entregan a un endosoma que contenga

ESCUDO DEFENSIVO

La autofagia despliega varios mecanismos de defensa contra los patógenos que invaden el citoplasma.



en su membrana TLR. Allí, las moléculas de los patógenos se encuentran por fin con los TLR. Ese encuentro constituye la señal para la producción celular de interferones, moléculas que suprimen la replicación del patógeno. Esa respuesta inmunitaria innata se activa para combatir las infecciones desde el mismo momento en que se producen; en poco tiempo, la célula despliega una respuesta altamente específica contra el patógeno.

Pero los autofagosomas ayudan a generar esa respuesta inmunitaria específica, denominada inmunidad adaptativa. Cuando un virus invade el citoplasma y engaña a la célula para que produzca proteínas víricas, un autofagosoma engulle algunas de esas proteínas y las conduce hasta otro tipo de endosomas que alojan en su membrana moléculas del complejo de histocompatibilidad de clase II. (Se abrevia CMH, de "complex major of histocompatibility".) Una vez en el interior del endosoma, la proteína vírica se fragmenta en pedazos; uno de estos fragmentos se coloca en una región del MHC de clase II que se halla orientada hacia el interior del endosoma. (Lo mismo que en el caso de los TLR, la molécula MHC de clase II no se habría encontrado con el patógeno en las condiciones idóneas si los autofagosomas no hubiesen llevado la molécula del patógeno hasta el interior del endosoma.) Después de la unión del fragmento del patógeno a la molécula MHC de clase II, y del transporte de este ensamblado hasta la superficie de la célula, el sistema inmunitario empieza a desplegar una respuesta adaptativa, que es más lenta pero más específica y eficaz que la respuesta inmunitaria innata.

¿Una larga vida?

La autofagia influye en la determinación de la esperanza de vida en los humanos. Suele darse por descontado que numerosas enfermedades están asociadas a la edad, entre ellas el cáncer y la degeneración neuronal. La razón puede esconderse en una pérdida de eficacia de la autofagia. Al menos en parte. Según Ana María Cuervo, de la facultad de medicina Albert Einstein de la Universidad de Yeshiva, los sistemas celulares, incluida la autofagia, experimentan con la edad una merma constante de actividad. En concreto, los sistemas que eliminan proteínas y orgánulos aberrantes o averiados comienzan a perder eficacia; la consiguiente acumulación de "basura" celular provoca la enfermedad.

En palabras de Cuervo, si una autofagia inoperante subyaciera bajo los trastornos asociados al envejecimiento, tendríamos ahí la razón de que la restricción calórica aumente la esperanza de vida en animales de experimentación. Se ha descubierto que cuanto menos comen esos animales (siempre que se les suministren los nutrientes esenciales), viven más. Otro tanto pudiera ocurrir con el hombre. Recordemos que la desnutrición (inanición incipiente) acelera la autofagia. Por tanto, la restricción calórica asociada al envejecimiento podría compensar la disminución natural de la autofagia vinculada a la edad y, de ese modo, prolongar las funciones de mantenimiento esenciales que este proceso desempeña en las células.

Además, añade Cuervo, la investigación nos demuestra que el mantenimiento de la autofagia en animales de experimentación puede prevenir la acumulación de proteínas dañadas por reacciones con compuestos oxigenados, un proceso asociado a la edad.

Lo que se tenía por una forma de evitar la inanición celular ha resultado formar parte esencial de una amplia red de factores que afectan a la salud y a la enfermedad en humanos. La investigación sobre la autofagia se está expandiendo en direcciones nuevas e inesperadas; el conocimiento científico generado aumenta de forma exponencial. Pero no hemos hecho sino comenzar. El control de la autofagia abriría grandes horizontes de esperanza para el tratamiento de enfermedades; quizá, también, para retrasar el envejecimiento. Que podamos aprovechar la autofagia en beneficio de la salud dependerá de que ahondemos en su mecanismo y en las intrincadas señales bioquímicas que la regulan.

NUEVOS TRATAMIENTOS

Mecanismos que permitieran regular (intensificar o suprimir) la autofagia en determinados tipos de célula se convertirían en un poderoso componente del arsenal médico. Exponemos aquí algunos ejemplos de posibles tratamientos.

ENFERMEDAD	ESTRATEGIA	OBJETIVOS
Cáncer	Inhibir la autofagia en las células de los tumores cancerosos	Evitar que las células tumorales consuman los contenidos de su propio citoplasma. De ese modo sobreviven en ambientes con escasez de oxígeno y nutrientes
Cáncer	Potenciar la autofagia en las células con riesgo de volverse cancerosas	Disminuir las posibilidades de que aparezcan mutaciones y tumores secundarios cuando una autofagia limitada permite la acumulación en la célula de moléculas dañinas para el ADN
Enfermedad de Huntington	Potenciar la autofagia con rapamicina (sirolimus)	Facilitar la eliminación de los microagregados proteicos que se acumulan en las células nerviosas
Tuberculosis	Potenciar la autofagia	Matar a los agentes patógenos que se esconden en el citoplasma, en enfermos y en portadores asintomáticos

Bibliografía complementaria

SUICIDIO CELULAR, EN LA SALUD Y EN LA ENFERMEDAD. Richard C. Duke, David M. Ojcius y John Ding-E Young en *Investigación y Ciencia*, n.º 245, págs. 44-52; febrero de 1997.

AUTOPHAGY IN HEALTH AND DISEASE: A DOUBLE-EDGED SWORD. T. Shintani y D. J. Klionsky en *Science*, vol. 306, págs. 990-995; 5 de noviembre, 2004.

AUTOPHAGY IN IMMUNITY AND INFECTION. A NOVEL IMMUNE EFFECTOR. Dirigido por Vojo Deretic. Wiley-VCH, 2006.

POTENTIAL THERAPEUTIC APPLICATIONS OF AUTOPHAGY. D. C. Rubinsztein, J. E. Gestwicki, L. O. Murphy y D. J. Klionsky en *Nature Reviews Drug Discovery*, vol. 6, págs. 304-312; abril de 2007.

Causalidad y epidemiología

La combinación del pensamiento poblacional con la comparación de grupos de personas permite extraer inferencias causales cuando no pueden deducirse por otra vía. Es imprescindible cuando la exposición a la causa no se puede controlar mediante la experimentación

Alfredo Morabia y Miquel Porta

CONCEPTOS BASICOS

- No siempre es posible determinar un mecanismo que ligue una causa y un efecto en un caso individual. En cambio, la epidemiología persigue establecer relaciones causales para una población; así, por ejemplo, entre el tabaquismo y el cáncer de pulmón.
- Austin Bradford Hill ofreció hace medio siglo una lista de criterios que ayudan a valorar si un cierto factor es causa de una enfermedad.
- Los criterios de Hill guardan una sorprendente semejanza con los establecidos por el filósofo David Hume en el siglo XVIII.

Los epidemiólogos se especializan en identificar las causas de los estados de salud. Las principales herramientas de que disponen para la adquisición de nuevos conocimientos son la comparación de grupos de personas y el "pensamiento poblacional", es decir, el razonamiento centrado en poblaciones.

Un conjunto de conceptos desarrollados y depurados a lo largo de la historia sustancia ese pensamiento poblacional. Nos referimos en especial a las nociones de riesgo, prevalencia, incidencia y tasa. Llamamos riesgo a la probabilidad de desarrollar un estado de salud (bueno o malo) durante un período de tiempo definido. Por prevalencia se entiende el número de personas que, en un momento determinado, padecen la enfermedad de interés dividido por el número de individuos de que conste la población estudiada. En cambio, la incidencia consiste en el número de nuevos casos de una enfermedad en una población en un período de tiempo. La incidencia dividida por la población no enferma da la tasa de incidencia, que es una de las medidas del riesgo.

Estas nociones resultan indispensables para describir el pasado, presente, futuro y dinámica de la salud de la población. Sin embargo, por sí sola, la componente poblacional del pensamiento epidemiológico no permite hacer inferencias causales. Que un 90 % de los casos de cáncer de pulmón se den en fumadores no significa, de por sí, que fumar cause cáncer de pulmón.

1. **LA NOCION DE CAUSALIDAD** nace de experiencias elementales: el vidrio de la ventana se rompe si se arroja una piedra. David Hume negó que se sustentase en algo más que en la extrapolación de aquello que hemos venido viendo. Intentar concebir un nexo necesario entre el impacto y la rotura, declaraba, estaba fuera de lugar. En cambio, formuló una serie de criterios, basados en la reiterada asociación de unos hechos con otros, para fundamentar las atribuciones de causa y efecto. Las ideas de Hume sobre la causalidad guardan una estrecha y sorprendente relación con las hoy vigentes en epidemiología.

INVESTIGACION Y CIENCIA

La búsqueda de causas necesita un segundo componente: la comparación de grupos. Será ya más creíble que fumar cause cáncer de pulmón si quienes padecen cáncer de pulmón fumaron, con anterioridad al diagnóstico, más que individuos comparables que no han desarrollado el cáncer. Un estudio de casos y controles compara enfermos de cáncer y controles sin cáncer. Un estudio de cohortes —de individuos expuestos y no expuestos a una causa hipotética— compara fumadores con no fumadores. Es el modo que tienen los epidemiólogos de crear las condiciones para la identificación de causas. La combinación de pensamiento poblacional y de comparación de grupos caracteriza a la epidemiología como disciplina científica.

El objetivo de este artículo es mostrar que la causalidad epidemiológica tiene su origen en modos de inferencia causal compatibles con el descubrimiento de causas de enfermedades para poblaciones, pero no necesariamente para individuos. Mediante relaciones probabilísticas se pueden demostrar las causas que afectan a una población, aunque no siempre las causas que afectan a los individuos.

La epidemia del cáncer de pulmón

El modo de inferencia causal al que suele recurrirse en la epidemiología contemporánea se desarrolló en la segunda mitad del siglo xx. Emergió en el marco de la controversia sobre la exposición al humo del tabaco y cáncer y,

CRITERIOS DE A. B. HILL Y LAS CORRESPONDIENTES “REGLAS POR LAS CUALES JUZGAR LAS CAUSAS Y EFECTOS” DE DAVID HUME

Los fundamentos de los criterios de causalidad utilizados en epidemiología tienen su origen en la filosofía de David Hume. Existe una estrecha coincidencia entre los criterios propuestos por Austin Bradford Hill en el artículo “Entorno y enfermedad: ¿asociación o causalidad?”, de 1965, y la lista de reglas elaborada en 1739 por Hume en su *Tratado sobre la Naturaleza Humana*, sección XV de la tercera parte del primer libro. Puesto que el tratado de Hume se publicó dos siglos y cuarto antes que el artículo de Hill no cabe hablar de una coincidencia perfecta. Hume presentó sus reglas como declaraciones universales, en tanto que los puntos de vista de Hill están redactados específicamente para la medicina preventiva. La comparación sugiere sin embargo una afinidad filosófica entre ambos autores. La semejanza adquiere particular intensidad en los criterios causales que Hill identifica como “temporalidad”, “gradiente biológico” y “consistencia”. La fuerza de la asociación, como medida de efecto relativo, no tiene un complemento exacto en las reglas de Hume.

CRITERIOS DE HILL	REGLAS DE HUME
1. Fuerza [o magnitud] de la asociación.	1. “Debe existir una unión constante entre causa y efecto” (Regla 3).
2. Consistencia: “¿Se ha observado [la asociación] repetidamente por diferentes personas, en diferentes lugares, circunstancias y tiempo?”	2. “…la multiplicidad de ejemplos que se parecen, por consiguiente, constituye la esencia misma de la capacidad [de producir un efecto] o de la conexión” (no es una regla específica, pero aparece en las premisas del catálogo, sección XIV, tercera parte, libro I).
3. Especificidad.	3. “La misma causa siempre produce el mismo efecto, y el mismo efecto nunca aparece si no es por la misma causa” (regla 4).
4. Temporalidad: “La relación temporal de la asociación: ¿cuál es la carreta y cuál el caballo?”	4. “La causa debe ser anterior al efecto” (regla 2).
5. Dosis-respuesta: “En caso de que la asociación pueda manifestar un gradiente biológico, o curva dosis-respuesta, deberemos buscarlo con la mayor atención. (…). Una curva dosis-respuesta nítida admite una explicación simple y es evidente que arroja mayor claridad sobre el caso”.	5. “Cuando un objeto cualquiera incrementa o disminuye con el incremento o disminución de su causa, será considerado un efecto compuesto que deriva de la unión de los diversos efectos que surgen de las diversas partes de la causa. Se supone aquí que la ausencia o presencia de una parte de la causa será seguida siempre por la ausencia o presencia de una parte proporcional del efecto. Esta conjunción constante es prueba suficiente de que esa parte es la causa de la otra. [...] ” (Regla 7).
6. Plausibilidad biológica.	6. No aplicable.
7. Coherencia.	7. Sin regla correspondiente.
8. Experimento.	8. No aplicable.
9. Analogía: “En algunas circunstancias sería correcto juzgar por analogía. Con los efectos que se han observado de la talidomida y la rubéola, deberíamos estar dispuestos a aceptar pruebas similares, aunque tengan menos peso, para otro fármaco u otra enfermedad viral durante el embarazo”.	9. “…donde diferentes objetos producen el mismo efecto, ha de ser por medio de alguna cualidad, que descubrimos es común entre ellos” (Regla 5). “Efectos parecidos implican causas parecidas” (Regla 5).

en particular, cáncer de pulmón: ¿era aquélla la causa de éste?

La controversia puso de manifiesto dos tipos de obstáculos con que tropezaban las inferencias causales en las investigaciones epidemiológicas. En primer lugar, sólo una pequeña fracción de los grandes fumadores (alrededor de un 10 %) desarrollaba el cáncer de pulmón a lo largo de su vida. Por tanto, las predicciones de que un cáncer suceda son exactas sólo para poblaciones. No podemos predecir qué individuo gran fumador enfermará. Sólo podemos anticipar con exactitud la magnitud del riesgo en las poblaciones; por ejemplo, el 10 % de los grandes fumadores desarrollará cáncer de pulmón primario, frente a menos de 1 % de las personas que no han fumado nunca.


3. John Stuart Mill (1806-1873)

El segundo obstáculo para efectuar inferencias causales es que el efecto del tabaco no puede estudiarse, con anterioridad al diagnóstico, mediante una intervención que cree dos grupos que difieran sólo en su exposición al tabaco: el hábito de fumar no puede asignarse al azar. No es éticamente aceptable, en este caso, la asignación aleatoria habitual en los ensayos clínicos de medicamentos. En verdad, los estudios epidemiológicos observacionales comparan siempre grupos que difieren en muchos aspectos. Así, se ha observado a menudo que los fumadores o los pacientes con cáncer de pulmón beben más alcohol, comen más carne y menos frutas y verduras, y realizan menos actividad física en comparación con los no fumadores o con personas sin cáncer de pulmón. Por tanto, el efecto del hábito tabáquico tiene que aislarse de los posibles efectos de esos "factores de confusión" (alcohol, verduras y ejercicio). Cuando se comparan grupos de personas, resulta a veces difícil medir bien y aislar o neutralizar tales factores de confusión.

En 1945 comenzó la búsqueda de las causas de una epidemia de cáncer de pulmón entre los varones de Occidente. En 1950, los estudios de casos y controles demostraron que los sujetos con cáncer de pulmón habían fumado con frecuencia mayor que los exentos de cáncer de pulmón. Se desató una controversia entre los epidemiólogos y los que no creían que el humo pudiese provocar un cáncer. La polémica contribuyó al refinamiento y formalización de los conceptos y métodos epidemiológicos, entre ellos el modo epidemiológico de efectuar inferencias causales.

En el curso de la controversia, los resultados de los estudios de cohortes demostraron, esta vez con solidez, que entre los fumadores había más cáncer de pulmón que entre los no fumadores. De tales comparaciones se desprendía la existencia de una asociación estadística entre fumar y cáncer de pulmón. No obstante, enseguida quedó claro que tales resultados no bastaban para establecer conclusiones firmes: las afirmaciones causales debían basarse en una síntesis de toda la información disponible (epidemiológica, biológica, toxicológica, etcétera).

Los criterios de Austin Bradford Hill

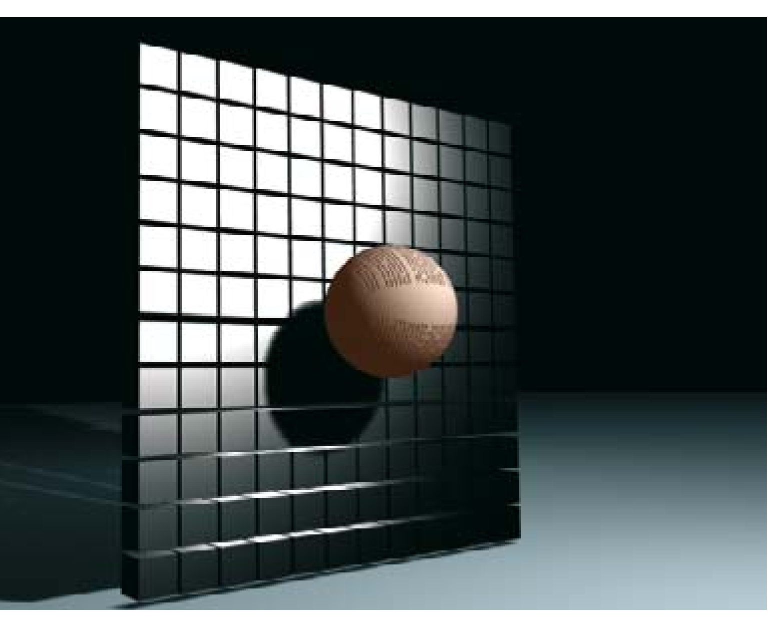
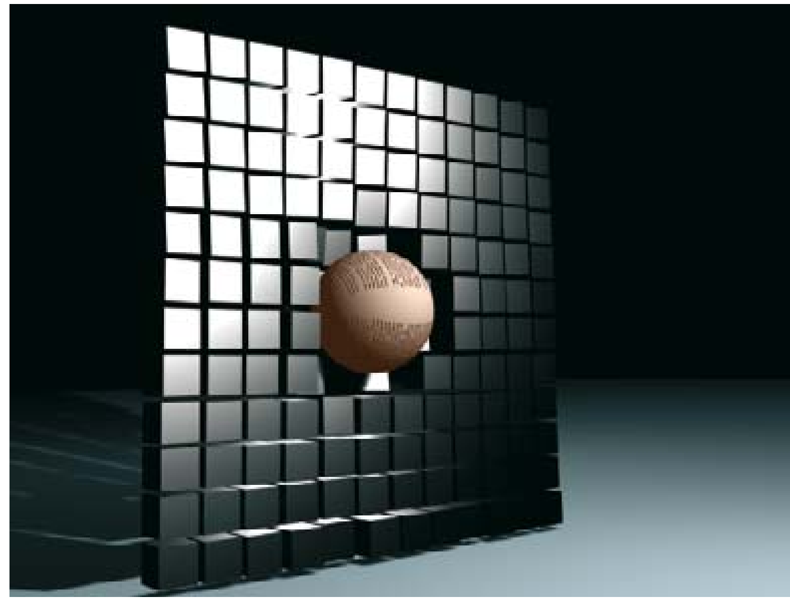
La descripción del enfoque finalmente utilizado por los epidemiólogos para establecer una conexión causal plausible entre el hábito tabáquico y el cáncer de pulmón se le debe a Austin Bradford Hill (1897-1991). En 1945 sucedió a Major Greenwood, primer catedrático de epidemiología de la Escuela de Higiene y Medicina Tropical de Londres, centro de investigación y formación de posgraduados de la Universidad de Londres. Hill fue uno de los principales metodólogos de la epidemiología. Sintetizó las ideas de la disciplina en su época. Entre los ensayos y artículos de revisión escritos por Hill hay uno clásico, cuya influencia alcanza a nuestros días: "Medio ambiente y enfermedad: asociación o causalidad". Se publicó en 1965. Merece la pena que comentemos algunas de sus partes.

Hill subrayaba que no podremos establecer inferencias causales —convertir la observación de una asociación en un veredicto de causalidad— si en primer lugar no hemos excluido el


2. David Hume (1711-1776)


4. Sir Austin Bradford Hill (1897-1991)

ALFREDO MORABIA Y MIQUEL PORTA

5. EN EPIDEMIOLOGIA, no cabe esperar que haya siempre unas relaciones causales manifiestas y simples, como entre la bola arrojada contra la pared de piezas y el derrumbe de ésta. La causalidad epidemiológica tiene un componente irreduciblemente probabilístico. Los criterios para la determinación de causas en epidemiología propuestos por Austin Bradford Hill en 1959 siguen de cerca las reglas para juzgar causas y efectos que Hume enunció en 1739.

papel del azar o de los sesgos en cada estudio. A continuación, daba una lista de nueve aspectos que tienden a caracterizar las relaciones causales: riesgo relativo, consistencia, especificidad del efecto, precedencia de la causa al efecto, proporcionalidad de la respuesta, plausibilidad biológica, coherencia epidemiológica, prueba experimental y analogía.

Empecemos por el primer aspecto, el riesgo relativo de la enfermedad asociado a la exposición. Los estudios epidemiológicos sobre el hábito de fumar habían mostrado que la tasa de mortalidad por cáncer de pulmón en los fumadores de cigarrillos era de nueve a diez veces superior a la tasa de mortalidad observada en los no fumadores. La tasa en grandes fumadores era de 20 a 30 veces superior.

La consistencia de la asociación observada constituye el segundo aspecto de una asociación causal: si personas diferentes en lugares, circunstancias y momentos distintos han observado repetidamente la asociación, habrá una buena razón para pensar en una asociación real. A este respecto, el comité consultor del Director General del Servicio de Salud Pública de los Estados Unidos halló que se había observado la asociación entre fumar y cáncer de pulmón en 36 estudios epidemiológicos. Encontrar casi la misma respuesta en una amplia variedad de situaciones, mediante distintas técnicas de estudio, justificaba que se considerase que la asociación no se debía a ningún artefacto ni error que afectara a todas las investigaciones.

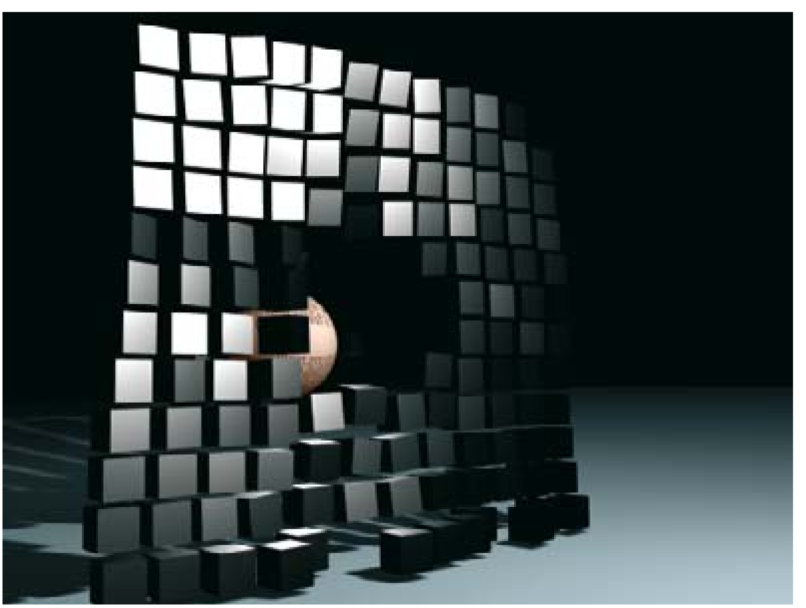
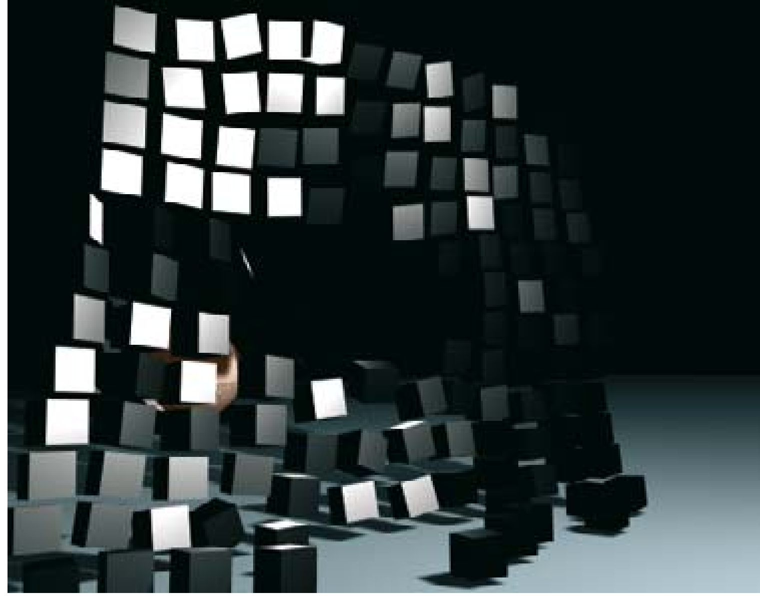
Un argumento poderoso a favor de la existencia de causalidad es que las asociaciones se limiten a subgrupos específicos de la población; pensemos, por ejemplo, en trabajadores expuestos a determinados agentes ambientales. Este tercer aspecto se refiere también a las asociaciones restringidas a determinados lugares y tipos de enfermedades. Si otras causas de muerte aumentan un 10 %, un 20 % o incluso un 50 % en los fumadores, mientras que el cáncer de pulmón se incrementa un 900 %-1000 %, tendremos una cierta especificidad del efecto.

Una exigencia de toda asociación causal es que "el caballo preceda al carro", es decir, la exposición a la causa debe preceder a la aparición del efecto o desenlace. Sin embargo, la dirección temporal de la asociación no siempre es evidente cuando observamos grupos de personas en su vida cotidiana. ¿Se debe a una dieta determinada la enfermedad o son los síntomas precoces y sutiles de la enfermedad los que dan lugar a los hábitos dietéticos que percibimos cuando se diagnostica la enfermedad? ¿Precede la obesidad a los trastornos de la rodilla o son éstos los que conducen al sedentarismo y la obesidad? Los estudios de cohortes suelen ofrecer más garantía de la anterioridad temporal de la exposición que los estudios de casos y controles.

Aunque no es imprescindible, una relación dosis-respuesta clara entre la exposición y el efecto clínico supone una explicación sencilla y suele avalar la existencia de una asociación causal. Que la tasa de mortalidad por cáncer de pulmón aumente con el número de cigarrillos fumados diariamente añade un poderoso elemento de juicio al mero hecho de que los fumadores manifiesten una tasa de mortalidad superior a los no fumadores.

Un sexto aspecto o criterio que propone Hill es la plausibilidad biológica de la relación causal propuesta. Ahora bien, ese criterio depende de los conocimientos biológicos existentes en cada momento. Hoy en día, encontrar mecanismos biológicos "plausibles"

INVESTIGACION Y CIENCIA

para "explicar" una observación es tal vez más fácil que cuando Hill y otros valoraban el posible carácter causal de ciertas observaciones. En todo caso, conviene que la interpretación causal de una asociación no choque con los conocimientos biológicos, clínicos y epidemiológicos establecidos. El comité consultor del Director General de Salud Pública creó para ello el concepto de "coherencia". Vieron que la asociación entre fumar y cáncer de pulmón era coherente con el aumento temporal que había tenido lugar en las dos variables durante la última generación; era coherente también con la diferencia entre sexos en las tasas de mortalidad. En este caso, el comité se refería a la "coherencia epidemiológica" de la hipótesis causal y no a su coherencia con los conocimientos biológicos.

La prueba experimental ayuda. Los conocimientos derivados de ensayos clínicos aleatorizados tienen una gran ventaja sobre los estudios observacionales: en los ensayos con asignación aleatoria de los tratamientos o exposiciones se comparan grupos que, al principio del estudio, no presentan diferencias en las características relacionadas con el desarrollo de los efectos. Sin embargo, por motivos éticos, cuando se trata de la salud humana sólo se permite el ensayo experimental para causas con un efecto protector (preventivo o terapéutico).

Finalmente, en algunas circunstancias es correcto juzgar una asociación causal por analogía. Recuérdese el caso de la talidomida, un medicamento para tratar las náuseas y vómitos en las embarazadas. Conocido ya que la exposición durante la gestación a la talidomida produce malformaciones congénitas, estaremos más dispuestos a aceptar que otros fármacos producen resultados similares.

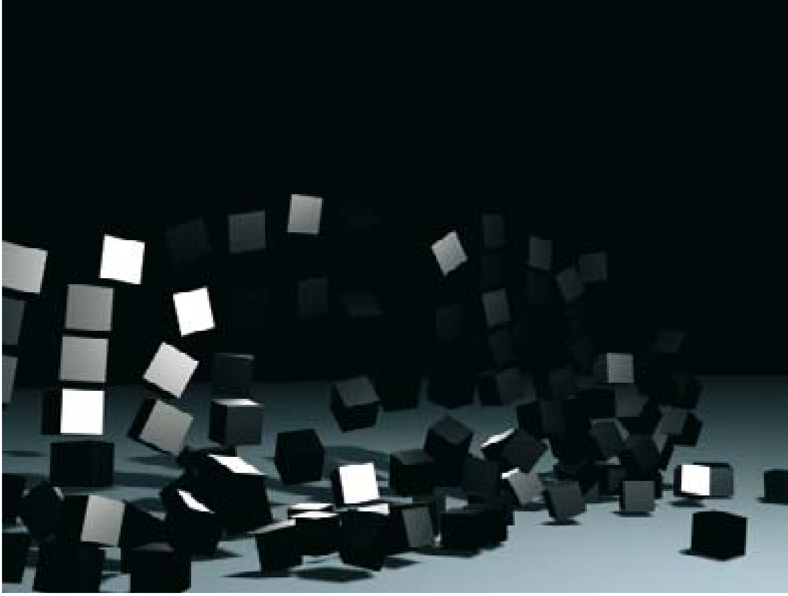
Criterios no suficientes

Ninguno de los nueve aspectos de Hill basta para certificar la existencia de causalidad. Ninguno, por sí solo, puede ofrecer pruebas indiscutibles a favor o en contra de la hipótesis causal. Y además ninguno es necesario, ninguno es condición *sine qua non* para que se dé una relación causal, excepto el criterio de la secuencia temporal.

Debe además señalarse que estos nueve aspectos de las relaciones causales no pueden sumarse sin más para obtener una "puntuación de causalidad". Cada uno de ellos posee mayor o menor peso según las características de la pregunta planteada en cada estudio. Así, en algunos casos es biológicamente coherente que la relación dosis-respuesta sea lineal y sin umbrales, mientras que en otros lo coherente será que haya umbrales, efectos de saturación o incluso efectos opuestos a dosis bajas y altas. Además, el criterio de la consistencia no tiene el mismo valor si la relación causal se ha estudiado a lo largo de varios años que si se trata de una hipótesis reciente.

Tomados en su conjunto, los criterios de Hill sirven para responder a la cuestión fundamental: ¿habrá una forma de ofrecer una explicación cabal del conjunto de hechos que tenemos sin apelar a una relación de causa a efecto? ¿Hay otra respuesta tan verosímil o más que la existencia de dicha relación causal?

Ciertamente, siempre persistirá la duda de si lo observado no puede ser fruto de la casualidad. Pero ese factor estocástico queda fuera de la lista de aspectos causales, pues no existen pruebas formales de significación estadística que diriman entre causalidad y casualidad. Las pruebas de significación estadística acotan el papel que el azar puede desempeñar en las

observaciones efectuadas; nos dicen cuál es la probabilidad de que ocurran por azar efectos de una determinada magnitud. Aparte de ello, no aportan "pruebas" a favor o en contra de una hipótesis causal.

El primer reconocimiento social del "enfoque mediante criterios causales" tuvo lugar con su aplicación explícita en el histórico informe de 1964 del Director General de Salud Pública de EE.UU., que concluía que el tabaquismo causaba cáncer de pulmón. El comité consultor entendió que no se trataba de una mera lista de puntos que debían cumplirse, sino de una guía para orientarse, para reflexionar. Y sigue plenamente vigente.

Los precursores de la causalidad epidemiológica

Como disciplina científica, la epidemiología apareció relativamente tarde. No podía preceder a los conceptos de probabilidad y pensamiento poblacional, que surgieron en el siglo XVII. Según Ian Hacking, de la Universidad de Toronto, la noción de probabilidad, que es fundamental en el pensamiento poblacional, nació alrededor de 1660. Versiones "vulgares" de la probabilidad figuraron durante cientos de años en la alquimia, la astrología y la geología, o en los juegos de azar. La primera monografía sobre probabilidad fue escrita por Christiaan Huygens en 1657. La primera aplicación conocida de probabilidades a cuestiones relacionadas con la salud humana fue la obra del inglés John Graunt titulada "Observaciones políticas y naturales sobre las cuentas de mortalidad...", que apareció en 1662.

La probabilidad se empleó en dos sentidos distintos. Para obtener frecuencias que mostraban una regularidad "similar a una ley" en datos estadísticos y para valorar proposiciones con un grado razonable de confianza, aun cuando las suposiciones no se basaran en pruebas estadísticas. Ambos sentidos fueron importantes para la epidemiología, pero es el segundo —el uso de la probabilidad para generar grados de credibilidad asociados a afirmaciones específicas no basadas directamente en datos— el más relevante para este artículo.

Antes de la publicación en 1739 del "Tratado de la naturaleza humana" de David Hume, el conocimiento científico se reservaba para la mecánica o la óptica, que demostraban la existencia de leyes naturales siempre válidas y reproductibles.

Hume afirmaba que las observaciones del pasado no determinaban necesariamente lo que acontecería en el futuro. En su opinión, si sólo por costumbre o hábito asociamos dos cualidades, ello no legitima la creencia de que dicha asociación se mantendrá en el futuro. El pan me nutre, pero ello no es una demostración de que el próximo pedazo de pan ejercerá efectos nutritivos. Sin embargo, ¿quién no apostaría a que seguirá teniendo valor nutritivo? Así lo hacemos porque creemos que podemos establecer generalizaciones, a partir de lo que hemos observado repetidamente en el pasado y formular predicciones razonables. Esa reflexión de Hume se tomó por fundamento de la existencia de un conocimiento de *lo probable*, basado en generalizaciones sensatas.

La idea de que los criterios de causalidad expuestos más arriba hunden sus raíces en la filosofía de Hume se hace evidente en la estrecha semejanza entre los aspectos de la causalidad propuestos por los epidemiólogos en el decenio de 1950 y sistematizados luego por Hill, y los formulados por Hume en su





obra (*véase la tabla de la página 64*). Puesto que el tratado de Hume se publicó 225 años antes que el artículo de Hill, es imposible que la coincidencia sea perfecta. Hume presenta sus reglas como afirmaciones universales, mientras que los puntos de vista de Hill se refieren sólo a la medicina preventiva.

La comparación sugiere, sin embargo, cierta vinculación o deuda de Hill con Hume. La coincidencia resulta sorprendente en los aspectos de las relaciones causales que Hill denominó "temporalidad", "gradiente dosis-respuesta" y "consistencia". Aunque la intensidad o magnitud de la asociación, como medida del efecto relativo, no tiene un complemento exacto en las reglas de Hume, el principio de la conjunción constante de Hume es, como el riesgo relativo, una medida de asociación. Existe cierta semejanza entre el concepto de analogía de Hill y la quinta regla de Hume. Y en los escritos de éste hallamos enunciados que se corresponden con los conceptos de Hill de especificidad y coherencia. (Por razones históricas, Hume no podría haber expresado los criterios hilleanos de "plausibilidad biológica" y la prueba experimental o semiexperimental.)

Ignoramos si Hill conocía las reglas de Hume. Mas, con independencia de que aquél o sus antecesores las conociesen, Hume concebía la evaluación de la causalidad de manera muy parecida a como lo hacen la mayoría de los epidemiólogos contemporáneos.

Los precursores: Mill

Otro precursor notable de la causalidad epidemiológica fue John Stuart Mill (1806-1873). Al considerar sus puntos de vista sobre la causalidad, se aprecia que parten, en buenas medida, de la comparación de grupos. La fuerza de la asociación y las relaciones dosis-respuesta se establecen mediante comparaciones de grupos (algo muy raro antes del siglo XVIII). Valorar la consistencia de los resultados epidemiológicos implica efectuar comparaciones entre expuestos y no expuestos a una hipotética causa (estudios de cohortes), o entre pacientes con la enfermedad que se estudia y controles libres de tal enfermedad (estudios de casos y controles). En "Un sistema de lógica", publicado en 1843, Mill describe cuatro métodos (que llama "cánones") de investigación experimental: de acuerdo, diferencia, residuos y variaciones concomitantes; todos ellos están basados en el principio de la comparación.

El método de la diferencia, segundo canon de Mill, presenta el principio fundamental de las comparaciones de grupos. Si una situación en la que el fenómeno que es objeto de estudio ocurre y otra en la que no ocurre presentan las mismas circunstancias en común excepto una, esa circunstancia, la única diferencia entre ambos casos, será el efecto, la causa o una parte indispensable de la causa del fenómeno. Este es el razonamiento típico de los diseños epidemiológicos, se trate de los estudios de cohortes o de los estudios de casos y controles, cuyo propósito es comparar "igual con igual". En epidemiología, sin embargo, el método debe reformularse en términos probabilísticos.

El método del acuerdo, primer canon de Mill, se contrapone al método de la diferencia. Tiene por objeto la búsqueda "de la única circunstancia común". El método de la variación concomitante es necesario cuando los objetos del experimento no se pueden manipular, la Luna o la Tierra por ejemplo. No podemos eliminar el efecto de la Luna sobre el mar,

Los autores

Alfredo Morabia es profesor de epidemiología del Queens College de Nueva York y de la Facultad Mailman de Salud Pública de la Universidad de Columbia. **Miquel Porta** es investigador del Instituto Municipal de Investigación Médica (IMIM-IMAS) de Barcelona, y catedrático de medicina preventiva y salud pública de la Universidad Autónoma de Barcelona. Es además catedrático adjunto de epidemiología de la Universidad de Carolina del Norte en Chapel Hill.

DISTRIBUCION DE LOS POSIBLES RESULTADOS DE LA PRUEBA EN CUESTION CUANDO SE COMPARAN CON UNA PRUEBA DE REFERENCIA

Los resultados de un test imperfecto se pueden clasificar en cuatro casillas, en cada una de las cuales anotamos los resultados obtenidos cuando se somete a los mismos individuos a la prueba en cuestión y a una prueba de referencia o 'patrón de oro':

Resultado de la prueba en estudio	**Resultado de la prueba de referencia, o 'patrón de oro'**	
	Positivo	Negativo
Positivo	a = verdaderos positivos	b = falsos positivos
Negativo	c = falsos negativos	d = verdaderos negativos

Sensibilidad = Verdaderos positivos / (Verdaderos positivos + falsos negativos) = a / (a + c)

Especificidad = Verdaderos negativos / (Verdaderos negativos + falsos positivos) = d / (d + b)

Valor predictivo positivo = Verdaderos positivos / (Verdaderos positivos + falsos positivos) = a / (a + b)

Valor predictivo negativo = Verdaderos negativos / (Verdaderos negativos + falsos negativos) = d / (d + c)

pero sí correlacionar la posición de la Luna con los niveles de las mareas.

Los cánones de Mill poseen algo especialmente atractivo para quienes nos interesamos por las relaciones causales y la salud humana: las causas que los métodos de diferencia, acuerdo y demás contribuyen a descubrir, son antecedentes particulares del fenómeno estudiado. Este es el tipo de causa que por lo general buscan los epidemiólogos más pragmáticos: un factor de riesgo que puede prevenirse, como fumar, el agua contaminada, el alcohol, las grasas saturadas, la falta de actividad física, etc. Por tanto, no debe extrañarnos que los cánones de causalidad de Mill se citen a menudo en los escritos de los epidemiólogos.

Al resumir las formas de acción coordinadas que pueden contribuir al descubrimiento de causas, Mill estableció una teoría de la comparación. Pensaba, sin duda, en las ciencias naturales; aducía "la trayectoria de los planetas" como ejemplo del método del acuerdo, la ley "de los cuerpos que caen" como ejemplo de los métodos del acuerdo y de la diferencia, "los movimientos cósmicos" como ejemplo de los métodos del acuerdo y de las variaciones concomitantes. Admite, no obstante, que podían aplicarse con éxito a las ciencias sociales, que también acostumbran a utilizar cierto pensamiento poblacional. Mill formalizó, pues, una teoría de las comparaciones de grupos. Desde entonces, las comparaciones de grupos combinadas con el pensamiento poblacional han constituido un principio filosóficamente válido de adquisición de conocimiento.

En breve, la lógica de la inferencia causal descrita por Hill encuentra su origen en los cambios intelectuales que acontecieron en la filosofía occidental entre los siglos XVII y XIX. Sus raíces se enlazan con la aparición del concepto de probabilidad.

Postulados de Koch y causalidad epidemiológica

El enfoque epidemiológico de la causalidad que hemos descrito en los párrafos precedentes se basa en una lógica muy diferente de la empleada en los "postulados de Koch", o "postulados de Henle-Koch", atribuidos a Robert Koch (1843-1910) y que evalúan la relación causal entre un nuevo agente infeccioso y una enfermedad clínica.

Parece que en 1840 Jakob Henle (1809-1885) enunció ya los criterios de causalidad que más tarde desarrolló su discípulo Robert Koch: el parásito se presenta en cada caso de la enfermedad en cuestión y bajo circunstancias que pueden justificar las alteraciones patológicas y el curso clínico de la enfermedad; no aparece en ninguna otra enfermedad como parásito fortuito o no patógeno; y, tras haber sido completamente aislado del cuerpo humano y haberse reproducido en cultivo puro, puede inducir la enfermedad de nuevo al ser inoculado.

Apoyada en los postulados de Henle-Koch, la bacteriología y la microbiología dieron pasos de gigante entre 1878 y 1887. Sin embargo, de ellos se sigue que la relación causal ocurre sistemáticamente y sin excepción en cada caso individual. Imitan las características de un procedimiento de diagnóstico perfecto; cabe considerarlos expresiones precoces de las nociones de sensibilidad y especificidad, que se

Bibliografía complementaria

A SYSTEM OF LOGIC (8ª EDICION 1881). J. S. Mill en *J. S. Mill's Philosophy of Scientific Method*, dirigido por E. Nagel. Hafner Publishing Co.; Nueva York, 1950.

SMOKING AND HEALTH. The Surgeon General's Advisory Committee. Public Health Service Publication n.º 1103; Washington, 1964.

ENVIRONMENT AND DISEASE: ASSOCIATION OR CAUSATION? A. B. Hill en *Proceedings of the Royal Society of Medicine*, vol. 58, págs. 295-300; 1965.

INVESTIGATING DISEASE PATTERNS. THE SCIENCE OF EPIDEMIOLOGY. P. D. Stolley, T. Lasky. Scientific American Library; Nueva York, 1995.

HISTORY OF EPIDEMIOLOGIC METHODS AND CONCEPTS. Dirigido por A. Morabia. Birkhäuser/Springer; Basilea, 2004.

introdujeron durante el siglo xx en la medicina clínica y, luego, en la epidemiología.

Podemos aplicar las cuatro medidas clásicas que valoran una prueba diagnóstica (sensibilidad, especificidad y valor predictivo positivo y negativo, definidos en la *tabla de la página opuesta*) a los resultados experimentales del propio Koch: la totalidad de los 62 animales inoculados con el bacilo de Koch presentaron tuberculosis, en tanto que ninguno de los 11 sin inocular desarrolló la enfermedad. Que el parásito se presente en cada caso de la enfermedad en cuestión (62 veces de 62 en la investigación de Koch) significa que la sensibilidad de la prueba fue de un 100 %. Que no apareciese en ninguna otra enfermedad como parásito fortuito o no patógeno (11 de 11 casos) da al test una especificidad también del 100 %. Y que tras haberlo aislado del cuerpo humano y haberse reproducido en cultivo puro pudiese inducir la enfermedad de nuevo al ser inoculado otorga a la prueba un valor predictivo del 100 % (62/62) y un valor predictivo negativo de nuevo del 100 % (11/11).

Hoy, estos cuatro “100 %” llaman poderosamente la atención, pues son cifras totalmente insólitas en la práctica de la medicina contemporánea. Los datos de Louis Pasteur (1822-1895) sobre la profilaxis del ántrax arrojan el mismo resultado: todos sus parámetros estadísticos tienen un valor del 100 %. De las 50 ovejas infectadas, las 25 inoculadas contra el ántrax sobrevivieron, mientras que murieron las 25 sin inocular.

Los “postulados” de Henle-Koch se siguen aplicando todavía en algunas circunstancias y enfermedades. Se adecuan a su pauta el ántrax, la tuberculosis, la erisipela, el tétanos. Pese a todo, tienen importantes limitaciones. No son aplicables a las bacterias de la fiebre tifoidea, difteria, lepra, fiebre recurrente y el cólera asiático, en buena parte por la dificultad de reproducir la enfermedad cuando se inoculaba a un animal de laboratorio. Koch creyó que el cumplimiento de los dos primeros postulados era suficiente prueba de causalidad. El segundo criterio también se volvió problemático cuando en sus estudios sobre el cólera, en 1893, Koch encontró portadores asintomáticos.

En resumen, los postulados de Henle-Koch constituyen herramientas harto rígidas para evaluar asociaciones causales incluso en las enfermedades infecciosas. No es de extrañar que bacteriólogos y virólogos del siglo xx hayan intentado modificarlos numerosas veces. Su aplicación a cuestiones epidemiológicas fue incluso más problemática. Los postulados de Henle-Koch eran —y son— incompatibles con la multiplicidad de causas de las enfermedades crónicas.

ADICCION AL TABACO

Nuevos hallazgos revelan que la nicotina crea adicción desde muy pronto. Los primeros cigarrillos provocan una alteración cerebral que estimula el deseo compulsivo de fumar

Joseph R. DiFranza

CONCEPTOS BASICOS

- Se cuartea el supuesto hasta ahora incuestionable de que la adicción al tabaco tarda años en adquirirse. De acuerdo con la nueva propuesta, la ansiedad por conseguir un cigarrillo, el síndrome de abstinencia y la imposibilidad de dejar el hábito se manifestarían ya en las primeras semanas de fumar.
- En el marco de esta tesis, el cerebro desarrolla muy pronto adaptaciones que contrarrestan los efectos de la nicotina y generan el síndrome de abstinencia cuando los efectos de la nicotina se disipan.
- Se subraya la importancia de fomentar la financiación pública de campañas antitabaco, dirigidas sobre todo a los más jóvenes.

Durante la fase de especialización en médico de familia, aprendí cuanto se sabía sobre la adicción a la nicotina. Se venía admitiendo que las personas fumaban, ante todo, por placer, llegando así a crearse una dependencia psicológica hacia esa sensación agradable. La tolerancia a los efectos de la nicotina incitaba a fumar más a menudo. Cuando el hábito alcanzaba una frecuencia crítica (unos cinco cigarrillos diarios) y el nivel de nicotina en sangre se mantenía constante, se iniciaba la dependencia física, al cabo de miles de cigarrillos y de años de fumar. Horas después del último cigarrillo, el fumador adicto sufría síntomas de abstinencia de nicotina: agitación, irritabilidad, falta de concentración, etcétera. Según ese modelo, los que fumaban menos de cinco veces al día no se consideraban adictos.

Eso afirmaba la doctrina recibida y eso creía yo. Hasta que, durante una revisión rutinaria, una adolescente me dijo que era incapaz de dejar el tabaco a pesar de llevar sólo dos meses fumando. Primero pensé que se trataba de un caso aislado, una excepción a la regla según la cual la adicción tarda años en aparecer. Se me despertó la curiosidad. Decidí ir al instituto local para entrevistar a otros estudiantes sobre esa cuestión. Una muchacha de 14 años me contó que había fracasado en sus dos únicos intentos serios de dejar el hábito; lo asombroso es que había fumado sólo dos meses a razón de unos pocos cigarrillos por semana. Los síntomas que describía recordaban a los de los pacientes empedernidos de dos paquetes diarios. La rápida aparición de los síntomas en ausencia de un consumo diario contradecía la doctrina común sobre la adicción a la nicotina. Cuando me remonté al origen de esas teorías, descubrí que no pasaban de conjeturas poco probables.

Financiado por dos instituciones estadounidenses, el Instituto Nacional del Cáncer y el Instituto Nacional sobre el Abuso de Drogas (NIDA, por sus siglas en inglés), he investigado durante los últimos diez años el desarrollo de la adicción a la nicotina en los fumadores noveles. Ahora sé que el modelo descrito en el primer párrafo de este artículo es pura ficción. Mi trabajo respalda una nueva hipótesis: la exposición limitada a la nicotina, aunque sea sólo a un cigarrillo, altera las neuronas cerebrales de una manera que estimula las ganas irresistibles de fumar (*craving*). Si mi tesis anduviera en lo cierto, podría abrir nuevos caminos para el desarrollo de fármacos y de otras terapias que faciliten la deshabituación al tabaco.

Pérdida de autonomía

Cuando en 1997 empecé a investigar sobre el tabaquismo con mis colaboradores de la facultad de medicina de la Universidad de Massachusetts en Worcester, nuestro primer reto fue desarrollar un instrumento fiable para detectar los síntomas de adicción en cuanto aparecen. En mi opinión, la característica que define la adicción es la pérdida de autonomía: el fumador descubre que abandonar el tabaco le cuesta esfuerzo u ocasiona molestia. Para detectar esa pérdida, concebí un cuestionario sobre la adicción a la nicotina, el HONC (de “Hooked On Nicotine Checklist”). Una respuesta afirmativa a cualquiera de sus preguntas indica que la adicción se ha iniciado. Utiliza-

do hoy en 13 idiomas, el HONC constituye el medidor de la adicción a la nicotina más contrastado. (Fácilmente podría adaptarse al estudio de otras drogas.)

Durante tres años hemos aplicado el HONC a centenares de adolescentes. En numerosos casos, la adicción se iniciaba muy pronto; en general, un mes después del primer cigarrillo. Durante las primeras semanas aparecían los síntomas de habituación: deseo de cigarrillos, intentos fallidos de dejar de fumar, etcétera. Por término medio, los adolescentes fumaban sólo dos cigarrillos por semana cuando empezaron a notar los primeros síntomas. Esos datos trastornaron las teorías entonces vigentes y arrojaron nueva luz sobre los mecanismos de la adicción. Sin embargo, cuando presenté los resultados en febrero de 2000 y proclamé que había jóvenes adictos que habían fumado sólo uno o dos cigarrillos, me miraron como si no supiera de lo que estaba hablando.

Numerosas personas, no expertas, me dijeron que su propia experiencia coincidía con mi tesis. Los científicos, en cambio, aunque pudieran creerme, no se arriesgaban a perder su reputación por afirmarlo en público. Cundía el escepticismo: la adicción no podía declararse con tal prontitud. ¿Cómo podían presentar

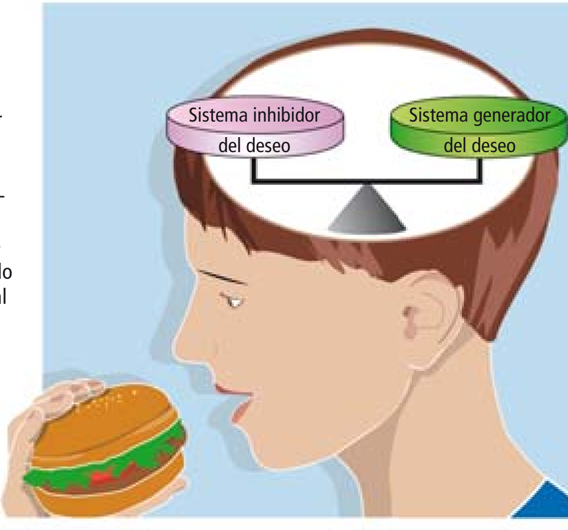


LOS ADOLESCENTES caen en las redes de la dependencia al tabaco a las pocas semanas de empezar a fumar. En un estudio, los jóvenes fumaban sólo unos dos cigarrillos por semana cuando aparecieron los primeros síntomas de adicción.

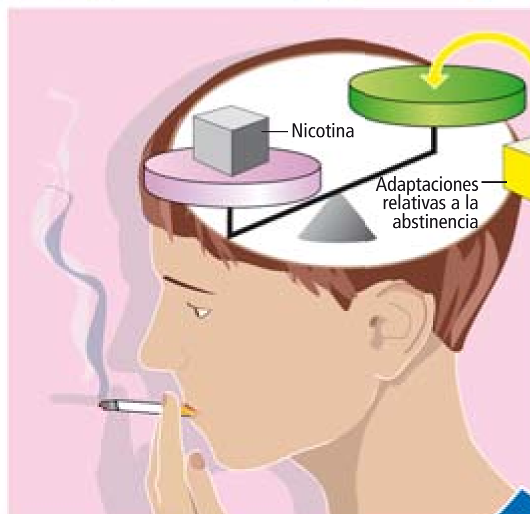
ADICCION RAPIDA

Se ha propuesto una nueva teoría para explicar la pronta aparición de los síntomas de abstinencia en fumadores incipientes. Aunque resulte controvertido, el modelo quizás arroje luz sobre la adicción al tabaco.

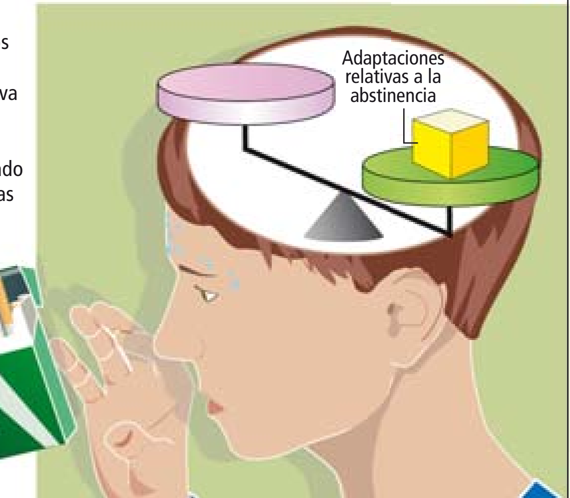
SANO EQUILIBRIO
En el cerebro de los no fumadores, los sistemas generador e inhibidor del deseo compulsivo de fumar se hallan en equilibrio. El sistema generador provoca un comportamiento apetitivo (comer, por ejemplo); el sistema inhibidor suspende ese comportamiento cuando el individuo se sacia (al final de la comida).



EL PRIMER CIGARRILLO
La nicotina estimula el sistema inhibidor del ansia de fumar hasta que su actividad sobrepasa la del sistema generador. El cerebro trata de restablecer el equilibrio mediante el rápido desarrollo de adaptaciones que potencian la actividad del sistema generador del deseo (adaptaciones relativas a la abstinencia).



ABSTINENCIA
Una vez disipados los efectos de la nicotina, el sistema inhibidor del ansia compulsiva de fumar regresa a un nivel de actividad menor. Pero el sistema generador, potenciado por las adaptaciones relativas a la abstinencia, vuelve a descompensar el estado cerebral y produce un deseo intenso de lo único que puede inhibir la apetencia: otro cigarrillo.



LISA APFELBACHER

síntomas de abstinencia fumadores sin un nivel constante de nicotina en sangre?

Con el tiempo llegó el desquite. Los equipos dirigidos por Jennifer O'Loughlin, de la Universidad McGill, Denise Kandel, de la Universidad de Columbia, y Robert Scragg, de la Universidad de Auckland, han repetido todos mis descubrimientos. Una docena de estudios establecen hoy que el síndrome de abstinencia de nicotina es común entre los fumadores noveles. El 10 por ciento de los que quedan enganchados notan los síntomas de adicción a los dos días de su primer cigarrillo; del 25 al 35 por ciento, antes de transcurrir un mes. En un extenso estudio con jóvenes neozelandeses, el 25 por ciento mostraron síntomas de adicción tras haber fumado de uno a cuatro cigarrillos. Y la temprana aparición de los síntomas enumerados en el HONC multiplicó casi por 200 las probabilidades de que esos jóvenes se convirtieran en fumadores diarios.

¿De qué modo la nicotina de un solo cigarrillo provoca adicción en el cerebro? La investigación anterior con animales descubrió que la exposición crónica a dosis elevadas de nicotina (el equivalente a fumar de uno a tres paquetes diarios) estimula un incremento del número de receptores neuronales con alta afinidad por la nicotina. La autopsia de personas fumadoras reveló un aumento del 50 al 100 por ciento en el lóbulo frontal del cerebro, el hipocampo y el cerebelo.

Convencí a Theodore Slotkin, de la Universidad Duke, para que determinara la exposición a la nicotina mínima necesaria para provocar la regulación al alza (aumento del número) de esos receptores. En días consecutivos, su equipo administró pequeñas dosis de nicotina (equivalentes a uno o dos cigarrillos) a ratas; hacia el segundo día vieron que se producía una regulación al alza en el hipocampo, estructura que interviene en la memoria a largo plazo. A continuación, Arthur Brody y su equipo, de la Universidad de California en Los Angeles, descubrieron que la nicotina de un cigarrillo era suficiente para ocupar el 88 por ciento de los receptores nicotínicos del cerebro. Aunque se desconoce la función que desempeña en la adicción el incremento de receptores, esos estudios dan un sentido fisiológico a la aparición de síntomas de abstinencia en adolescentes a los dos días de su primer cigarrillo.

Según los expertos, el síndrome de abstinencia es el resultado de adaptaciones homeostáticas inducidas por la droga; vale decir, los intentos del organismo por mantener en equilibrio sus funciones y composición. Ciertas drogas adictivas aumentan la producción

de neurotransmisores; el organismo responde mediante el desarrollo de adaptaciones que inhiben tales sustancias. Cuando el usuario cesa de tomar la droga, sin embargo, la inhibición se torna excesiva y aparecen los síntomas de abstinencia. Esas adaptaciones relativas a la abstinencia podrían desarrollarse muy poco después del primer cigarrillo, puesto que otras drogas adictivas como la morfina producen similares cambios precoces. La mayoría de los fumadores habituales aguantan sólo una o dos horas sin que ansíen fumar otro cigarrillo; los principiantes, varias semanas. Sorprende que, en las primeras fases de la adicción, baste un solo cigarrillo para suprimir durante semanas los síntomas de abstinencia, aun cuando la nicotina se haya eliminado en un día.

Hay una explicación para tal fenómeno: las consecuencias de inundar el cerebro de nicotina persisten, aun cuando ésta ha desaparecido ya del organismo. La nicotina activa circuitos cerebrales en los que intervienen acetilcolina, dopamina, ácido gamma-aminobutírico (GABA), glutamato, noradrenalina, péptidos opioides y serotonina. En los múridos, una sola dosis de nicotina aumenta la síntesis de noradrenalina en el hipocampo, al menos durante un mes; los efectos de la nicotina en ciertas funciones neurológicas y cognitivas se prolongan varias semanas. Aunque se desconoce si tales fenómenos guardan relación con el síndrome de abstinencia, resulta paladino que el impacto de la nicotina dura más que su presencia en el cerebro.

El intervalo libre de síntomas que transcurre entre el último cigarrillo fumado y el inicio de los síntomas de abstinencia se denomina "latencia del síndrome de abstinencia". Para los fumadores incipientes, un período largo. Basta un cigarrillo cada pocas semanas para mantener a raya el síndrome. Pero si se fuma más a menudo, se desarrolla la tolerancia: el efecto de cada cigarrillo disminuye; la latencia se acorta y el intervalo entre cigarrillos debe reducirse para evitar la aparición del síndrome de abstinencia. Hablamos entonces de tolerancia asociada a la dependencia.

A diferencia de las adaptaciones relativas a la abstinencia, que pueden aparecer de un día para otro, la tolerancia asociada a la dependencia se establece de forma paulatina. Pueden pasar años antes que la latencia se acorte hasta exigir fumar cinco cigarrillos al día. Los síntomas de abstinencia son, pues, la causa de un consumo intenso a largo plazo, y no a la inversa, como se creía.

Una nueva teoría

Nunca me ha convencido la idea de que se fume por placer; de hecho, algunos de mis pacientes más adictos aborrecen el hábito. Si el móvil del placer fuera cierto, los fumadores empedernidos disfrutarían más del tabaco. Eric Moolchan, del NIDA, demostró que, pese a crecer con el tiempo su adicción, los adolescentes manifestaban que decaía el placer de fumar. Necesitábamos una teoría nueva que explicara los hechos.

Mientras me esforzaba por desentrañar el célere establecimiento de la adicción a la nicotina, reparé en una paradoja. A todas luces, el único efecto de la nicotina es una suspensión temporal del deseo de fumar, pese a que tal deseo lo padecen sólo quienes previamente han estado expuestos a ella. ¿Cómo puede una droga provocar, a un tiempo, una ansiedad compulsiva de fumar y suprimirla? Comencé a pensar que el efecto inmediato de la nicotina era el cese de las ganas irresistibles de fumar y que este efecto aumentaba hasta un grado sumo, dado que las dosis subsiguientes de nicotina provocaban respuestas más intensas que la primera. Ese fenómeno, común a todas las drogas adictivas, se llama sensibilización. El cerebro podría entonces desarrollar muy pronto adaptaciones relativas a la abstinencia que contrarrestasen los efectos de la nicotina, de modo que restablecieran el equilibrio homeostático. Pero en cuanto se disipara la impronta de la nicotina, esas adaptaciones estimularían el deseo de otro cigarrillo.

Según esa teoría, sensibilización y homeostasis operan de forma conjugada: la nicotina no resulta adictiva porque produce placer, sino porque suprime la ansiedad compulsiva de tabaco. Dado que la nicotina estimula las neuronas, la consideré un agente excitador de las células nerviosas en un sistema cerebral inhibidor del deseo de fumar. La activación de ese hipotético sistema desactivaría luego un sistema complementario encargado de generar ansiedad compulsiva. La función natural del sistema generador de la ansiedad compulsiva consistiría en recibir estímulos sensoriales (por la vista o el olfato), compararlos con los recuerdos de objetos gratificantes (como los alimentos) y generar el deseo que motiva y dirige el apetito (el acto de comer). Competiría al sistema inhibidor de la ansiedad compulsiva señalar la satisfacción, de modo que el animal abandone el comportamiento apetitivo cuando ello sea oportuno.

Puesto que el organismo intentaría mantener en equilibrio ambos sistemas, la supresión nicotínica del sistema generador del deseo de fumar activaría adaptaciones asociadas a la abstinencia, que intensificarían la actividad de este sistema. Durante el período de abstinencia, cuando el efecto inhibidor de la nicotina

GLOSARIO DEL FUMADOR

Síndrome de abstinencia: Lo conforman ansia, agitación, nerviosismo, irritabilidad, falta de concentración y trastornos del sueño.

Latencia del síndrome de abstinencia: Intervalo libre de síntomas que transcurre entre el último cigarrillo y el inicio de los síntomas de abstinencia. Al cabo de muchos años de consumo de tabaco, se acorta desde semanas hasta minutos.

Tolerancia asociada a la dependencia: Mecanismo que produce una reducción gradual de la latencia del síndrome de abstinencia.

Adaptaciones relativas a la abstinencia: Mecanismo que mimetiza la acción de la nicotina mediante la inhibición del ansia compulsiva de fumar. Se desarrolla en los ex fumadores para compensar los efectos duraderos de la tolerancia asociada a la dependencia.

El autor

Joseph R. DiFranza es médico de familia y profesor de la facultad de medicina de la Universidad de Massachusetts en Worcester. DiFranza ha luchado contra la venta de tabaco a los jóvenes.

ya se ha disipado, el sistema generador del deseo queda en un estado de excitación tal, que despertará un apetito irrefrenable de otro cigarrillo. Esas oscilaciones de la actividad cerebral obedecerían a cambios rápidos en la configuración de los receptores neuronales. De ahí que los adolescentes puedan desear un cigarrillo tras haber fumado una sola vez.

Nuestro modelo viene avalado por la investigación basada en la técnica de formación de imágenes de resonancia magnética funcional (RMf). Evidencian esos trabajos que la estimulación del deseo de nicotina, alcohol, cocaína, opiáceos y chocolate aumenta la actividad metabólica en el giro cingulado anterior y otras zonas del lóbulo frontal. Habría, cabe inferir, un sistema generador de ansiedad compulsiva. De acuerdo con la investigación reciente acometida por el grupo de Hyun-Kook Lim, de la Universidad de Corea, la nicotina desactiva ese sistema. Han demostrado que la administración previa de la droga bloquea el patrón de activación regional del cerebro que, en los humanos, se asocia al deseo inducido.

La hipótesis de sensibilización y homeostasis explica también la relación entre tolerancia y dependencia. La repetida supresión del sistema generador del deseo de fumar desencadena otra adaptación homeostática que estimula ese deseo mediante la abreviación del efecto inhibidor de la nicotina. Como ya se ha señalado, la tolerancia se desarrolla mucho más despacio que las adaptaciones relativas a la abstinencia; pero, una vez aparecida, se arraiga con firmeza. Aunque suelen transcurrir dos o más años hasta que un adolescente necesite fumar cinco cigarrillos al día, observé que, cuando mis pacientes abandonaban el hábito y lo reanudaban luego, tardaban sólo unos días en recuperar su antiguo ritmo de consumo, después incluso de una abstinencia prolongada.

Junto con Robert Wellman, sometimos a encuesta sobre dicho fenómeno a 2000 fumadores. Se les preguntaba cuánto fumaban antes de dejarlo, la duración de su abstinencia y cuánto fumaron inmediatamente después de reanudar el consumo. Los que habían pasado tres meses sin fumar volvieron a hacerlo a un ritmo próximo al 40 por ciento del anterior; su latencia del síndrome de abstinencia se había, pues, alargado. Creemos que el intervalo exento de ansiedad compulsiva entre cigarrillos aumenta porque las adaptaciones relativas a la abstinencia desaparecen a las pocas semanas de dejar el hábito. Al fumar de nuevo, sin embargo, esas adaptaciones vuelven a desarrollarse con prontitud: transcurridas escasas semanas, los reincidentes tornan a fumar con pareja frecuencia.

CUESTIONARIO SOBRE LA ADICCION A LA NICOTINA

La siguiente lista de preguntas se utiliza para determinar si los adolescentes son adictos al tabaco. Un "sí" a cualquiera de las preguntas indica que la adicción se ha iniciado:

¿Has intentado alguna vez dejar de fumar, pero no lo has logrado?

¿Fumas actualmente porque te cuesta mucho trabajo dejarlo?

¿Te has sentido alguna vez adicto al tabaco?

¿Sientes a veces un deseo compulsivo de fumar?

¿Has tenido alguna vez la sensación de necesitar un cigarrillo?

¿Te resulta difícil no fumar en lugares donde no se debe fumar, como en la escuela?

Cuando has intentado dejar de fumar o has dejado de hacerlo durante algún tiempo:

- ¿Te ha costado concentrarte porque no podías fumar?
- ¿Te has notado más irritable por no poder fumar?
- ¿Has sentido un deseo vehemente de fumar?
- ¿Te has notado nervioso, inquieto o ansioso porque no podías fumar?



SCOTT GIBSON *Corbis*

Descubrimos también que las abstinencias que superaban los tres meses apenas ejercían un efecto adicional sobre la latencia del síndrome de abstinencia. Aunque se pasen años sin fumar, el hábito se reanuda a un ritmo próximo al 40 por ciento del anterior, unos seis o siete cigarrillos al día. De lo que se infiere que los incrementos de tolerancia podrían tener carácter permanente; un solo cigarrillo nunca aliviará tanto las ganas de fumar a un fumador reincidente como a un fumador incipiente. En otras palabras: el cerebro de un fumador nunca recupera su estado inicial.

Pero si la tolerancia asociada a la dependencia estimula el deseo de fumar y nunca desaparece del todo, ¿por qué los ex fumadores no siguen apeteciendo el tabaco el resto de su vida? Los sujetos indagados no supieron dar una razón de que su ansia compulsiva de nicotina terminara por aplacarse. Según la teoría de la sensibilización y homeostasis, los que han dejado de fumar deben desarrollar adaptaciones relacionadas con la abstinencia que mimeticen la acción de la nicotina, inhiban el ansia por el tabaco y restauren la homeostasis. El cese del consumo de nicotina no conllevaría un tranquilo retorno a la función normal del cerebro; más bien desencadenaría un período dinámico de neuroplasticidad, durante el cual aparecerían nuevas adaptaciones cerebrales. Debido a tales adaptaciones, el cerebro del ex fumador no se asemejaría al de un fumador ni al de alguien que no haya fumado nunca.

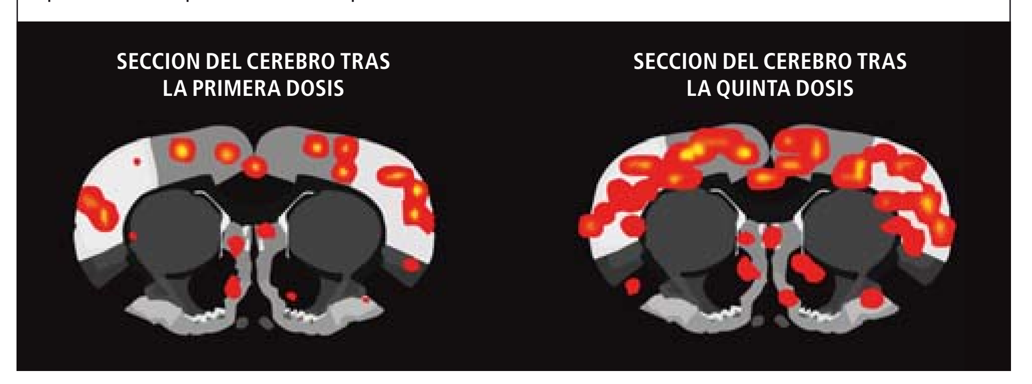
Para comprobar tal predicción, Slotkin y sus colaboradores examinaron el cerebro de ratas antes de exponerlos a la nicotina, durante la exposición, durante el período de abstinencia y largo tiempo después. Hallaron señales inequívocas de cambios funcionales en las neuronas de la corteza cerebral que emplean acetilcolina y serotonina para transmitir señales, cambios visibles sólo después del período de abstinencia aguda. De acuerdo con las predicciones, el cerebro de las ratas "ex fumadoras" mostraba adaptaciones que no estaban presentes en las "fumadoras" ni en las "no fumadoras".

En la facultad de medicina de la Universidad Católica de Corea, HeeJin Lim y su grupo encontraron, en el curso de su investigación sobre el factor neurotrófico derivado del cerebro (estimulante de la neuroplasticidad), señales de una remodelación cerebral en las personas que habían dejado de fumar. Los niveles de ese factor en los ex fumadores se triplicaban al cabo de dos meses de abstinencia.

Las adaptaciones relacionadas con la abstinencia parecen, pues, contrarrestar las adaptaciones relativas a la tolerancia a través de la inhibición del sistema que genera el deseo de

LA NICOTINA EN EL CEREBRO

La nicotina suscita rápidas modificaciones en la fisiología cerebral. Jean A. King, del Centro de Neuroimagen de la facultad de medicina de la Universidad de Massachusetts, y el propio autor han utilizado la resonancia magnética funcional (RMf) para medir los niveles de actividad metabólica en el cerebro de ratas a las que se había administrado nicotina durante cinco días seguidos. La respuesta a la primera dosis fue limitada (*rojo, a la izquierda*), pero la actividad cerebral aumentó en intensidad (*amarillo*) y extensión tras la quinta dosis (*derecha*). De los datos se desprende que el cerebro se torna muy pronto sensible a la nicotina, lo que explica que la adicción aparezca al cabo de pocas dosis.



WEI HUANG *Centro de Neuroimagen*, UMMS/WPI

fumar; éste deja al fin de obligar al ex fumador a que encienda un cigarrillo. Aun así, las incitaciones a fumar presentes en el entorno podrían avivar el apetito. A quien, tras mantener una larga abstinencia, se rindiera sólo por una vez al ansia de fumar, la nicotina volvería a producir una profunda supresión del sistema que genera tamaña ansiedad compulsiva.

Las adaptaciones relativas a la abstinencia empeorarían entonces una situación ya mala en sí misma. Dado que esas adaptaciones mimetizan el efecto de la nicotina, deberían suprimirse para restaurar la homeostasis; cuando se disipara el efecto de la nicotina, las adaptaciones relativas a la tolerancia quedarían sin oposición en la estimulación del sistema que genera el ansia de fumar. Presa de un deseo vehemente, el fumador reincidente necesitaría encender seis o siete cigarrillos al día para mantenerlo controlado.

Nueva esperanza para los fumadores

Esta teoría sobre la adicción en modo alguno representa la opinión predominante. Según mi tesis, la adicción constituye un accidente fisiológico. Sabido que numerosos profesionales sostienen que la adicción tiene raíces psicológicas y no fisiológicas, no esperaba que mis ideas recibieran una calurosa acogida.

Sea correcto o no el modelo de la sensibilización y homeostasis, es evidente que la nicotina de un solo cigarrillo resulta suficiente para provocar una remodelación del cerebro. Aunque podrían discutirse los criterios que deberían aplicarse para obtener un diagnóstico correcto de la adicción, damos por cierto que los adolescentes empiezan a manifestar síntomas de adicción poco después de haber fumado su primer cigarrillo. Este descubrimiento subraya la importancia de fomentar la financiación estatal de las campañas antitabaco.

Para someter a contrastación la nueva teoría, se requiere un método que detecte la sensibilización en humanos. He trabajado con el equipo de Jean A. King, del Centro de Neuroimaginería Comparada, para demostrar, mediante resonancia magnética funcional, la sensibilización a la nicotina en las ratas. Las imágenes que comparan la respuesta cerebral a la primera dosis de nicotina y a la quinta dosis, administrada cinco días después, revelan cambios espectaculares de la función cerebral en el giro cingulado anterior y el hipocampo. El NIDA nos ha otorgado una subvención para visualizar mediante RMf la sensibilización en los fumadores. Nos proponemos determinar las regiones cerebrales que intervienen en los sistemas que inhiben y generan la ansiedad compulsiva de fumar.

A largo plazo, nos planteamos identificar fármacos que operen sobre esos sistemas para el tratamiento y la cura de la adicción. Aunque las terapias sustitutorias de la nicotina puedan duplicar su tasa de éxito en el abandono del tabaco, el número de intentos fallidos sobrepasa ampliamente el de los logros. Según la teoría de la sensibilización-homeostasis, el remedio debería basarse en una terapia que inhiba el deseo vehemente de fumar sin estimular respuestas compensadoras que a largo plazo no hacen sino agravar la sensación de privación. Una mejor comprensión de la adicción impulsaría el desarrollo de nuevos tratamientos que permitirían a los fumadores desengancharse del abrazo mortal de la nicotina.

Bibliografía complementaria

MEASURING THE LOSS OF AUTONOMY OVER NICOTINE USE IN ADOLESCENTS: THE DANDY (DEVELOPMENT AND ASSESSMENT OF NICOTINE DEPENDENCE IN YOUTHS) STUDY. Joseph R. DiFranza, Judith A. Savageau, Kenneth Fletcher, Judith K. Ockene, Nancy A. Rigotti, Ann D. McNeill, Mardia Coleman y Constance Wood en *Archives of Pediatrics & Adolescent Medicine*, vol. 156, n.º 4, págs. 397-403; abril de 2002.

THE DEVELOPMENT OF SYMPTOMS OF TOBACCO DEPENDENCE IN YOUTHS: 30-MONTH FOLLOW-UP DATA FROM THE DANDY STUDY. Joseph R. DiFranza, Judith A. Savageau, Kenneth Fletcher, Judith K. Ockene, Nancy A. Rigotti, Ann D. McNeill, Mardia Coleman y Constance Wood en *Tobacco Control*, vol. 11, n.º 3, págs. 228-235; septiembre de 2002.

A SENSITIZATION-HOMEOSTASIS MODEL OF NICOTINE CRAVING, WITHDRAWAL AND TOLERANCE: INTEGRATING THE CLINICAL AND BASIC SCIENCE LITERATURE. Joseph R. DiFranza, Robert J. Wellman en *Nicotine & Tobacco Research*, vol. 7, n.º 1, págs. 9-26; febrero de 2005.

EL RECICLADO NUCLEAR

Frank N. von Hippel

En EE.UU. están en marcha planes para reutilizar el combustible agotado de los reactores, pero sus ventajas son nimias comparadas con los peligros

CONCEPTOS BASICOS

- El combustible nuclear agotado contiene plutonio, que puede extraerse y emplearse en un combustible nuevo.
- Para reducir la cantidad de residuos radiactivos de larga vida, el Departamento de Energía de EE.UU. ha propuesto reprocesar el combustible agotado por este procedimiento y luego "quemar" el plutonio en reactores especiales.
- Pero el reprocesado es muy caro. Además, el combustible agotado emite radiaciones letales, mientras que el plutonio separado se maneja sin problemas. Por ello, el reprocesado se presta a que se robe plutonio para fabricar una bomba atómica.
- El autor argumenta contra el reprocesado y a favor de almacenar los residuos en contenedores hasta que se disponga de un cementerio subterráneo.

Aunque ha transcurrido una docena de años desde que en EE.UU. entró en servicio el último reactor nuclear para la generación de energía eléctrica, hoy se perciben indicios de un renacer de ese tipo de centrales. Los incentivos están ahí: los precios del gas natural y del petróleo han subido por las nubes; crecen las protestas públicas contra las emisiones de gases de invernadero creadas por la quema de combustibles fósiles; y el gobierno federal ha ofrecido hasta 8000 millones de dólares en subsidios y seguros contra los retrasos en las licencias (con unas leyes nuevas para racionalizar el proceso) y 18.500 millones de dólares en avales. ¿Qué más podría desear la moribunda industria de la energía nuclear?

Sólo una cosa: un lugar adonde enviar el combustible usado. Ciertamente, la falta de un basurero nuclear sigue siendo una nube negra que se cierne sobre el sector. La inauguración de un basurero federal en el monte Yucca (Nevada) —ahora prevista para 2017 como muy pronto— ya se ha retrasado dos decenios, y las piscinas de desactivación donde se guarda el combustible agotado en las centrales nucleares se están quedando sin espacio.

En consecuencia, la mayoría de las empresas nucleares están empezando a almacenar el combustible agotado más antiguo en terreno seco dentro de enormes contenedores, cada uno de los cuales almacena por regla general 10 toneladas de residuos. Un reactor de 1000 megawatt descarga al año combustible suficiente para llenar dos de esos contenedores, a un precio aproximado de un millón de dólares por unidad. Pero no se reduce a eso lo que la industria está haciendo. Las empresas nucleares de EE.UU. han demandado al gobierno federal porque no habrían incurrido en tales gastos si el Departamento de Energía hubiera inaugurado el basurero del monte Yucca en 1998, tal y como estaba originalmente planeado. Como resultado, el gobierno está pagando los contenedores y los consiguientes gastos de infraestructura y funcionamiento, una factura que asciende a unos 300 millones de dólares anuales.

Presionado para iniciar el traslado del combustible desde sus actuales emplazamientos, el Departamento de Energía ha vuelto sobre una idea que abandonó en los años setenta del pasado siglo: reprocesar químicamente el combustible agotado para separar los elementos componentes. Algunos pueden reutilizarse. Hace más de diez años que en Francia y el Reino Unido funcionan plantas de reprocesado, y Japón empezó a explotar en 2006 su propia planta, que les costó veinte mil millones dólares. No hablamos, pues, de una estrategia sin precedentes. Pero, tal como veremos más adelante, el reprocesado es una senda cara y peligrosa.

El elemento del infierno

Para captar el porqué de mi rechazo al reprocesado del combustible nuclear bastan unos conocimientos rudimentarios del ciclo del combustible nuclear y cierta dosis de sentido común. Los reactores de potencia generan calor —y éste produce el vapor que acciona las turbinas de los generadores eléctricos— manteniendo una reacción nuclear en cadena que escinde ("fisiona") los átomos. La mayor parte del tiempo el combustible es uranio, artificialmente enriquecido, de suerte que entre 4 y 5 por ciento del mismo consista en el isótopo 235, desencadenante de la reacción en cadena; el resto es casi en su totalidad uranio 238. Los ladrones de un uranio enriquecido sólo al 5 ciento no podrían emplearlo para construir una bomba atómica ilícita.

En el reactor, parte del uranio 238 absorbe un neutrón y se convierte en plutonio 239, que reacciona también en cadena y puede "quemarse" en parte una vez extraído y pre-

LISA APFELBACHER (*logo*)



LA HAGUE, en la costa normanda de Francia, alberga un gran complejo de reprocesado del combustible agotado procedente de centrales nucleares, del que extrae el plutonio para hacer nuevo combustible. El Departamento de Energía de EE.UU. se ha planteado construir una instalación similar.

MARTIN BOND *Photo Researchers, Inc.*

parado. Pero este procedimiento adolece de varios inconvenientes. En primer lugar, la extracción y el procesado, mucho más caros que el combustible nuevo. Luego, el reciclado del plutonio, que apenas si reduce el problema de los residuos. E importantísimo es que el plutonio separado puede servir para construir bombas atómicas si cae en manos terroristas. Por consiguiente, hay que dedicar grandes esfuerzos para protegerlo hasta que vuelva a formar parte de un combustible agotado.

Estos inconvenientes quedan llamativamente claros al examinar las experiencias de los países que han acometido programas de reprocesado. En Francia, líder mundial en la técnica del reprocesado, el plutonio separado (comvertido en dióxido de plutonio al combinarlo con oxígeno) se mezcla con uranio 238 (también en forma de óxido) para crear un combustible de "óxido mezclado", o MOX. Tras haberlo empleado para generar más energía, el combustible MOX agotado contiene todavía aproximadamente un 70 por ciento de plutonio con respecto al que tenía recién manufacturado; sin embargo, la adición de los productos de fisión, altamente radiactivos, que se generan dentro de un reactor hace que no sea fácil acceder a ese plutonio, ni convertirlo en una bomba. El combustible MOX usado se devuelve a la planta de reprocesado para su almacenamiento indefinido. En definitiva, Francia usa el reprocesado para trasladar el problema del combustible agotado desde donde está el reactor hasta la planta de reprocesado.

Japón esta siguiendo el ejemplo francés. El Reino Unido y Rusia se limitan a almacenar su plutonio civil separado: unas 120 toneladas entre ambos desde 2005, suficiente para 15.000 bombas atómicas.

Hasta hace poco, Francia, Rusia y el Reino Unido ganaban dinero reprocesando el combustible agotado de otros países, como Japón y Alemania, cuyos activistas antinucleares domésticos exigían que el gobierno demostrase poseer una solución para el problema del combustible agotado o cerrase los reactores. Las autoridades de esos países descubrieron que enviar al extranjero el combustible agotado para su reprocesado era una manera cómoda, aunque costosa, de tratar sus residuos nucleares, al menos temporalmente.

Con esos contratos en la mano, a Francia y al Reino Unido les fue posible financiar nuevas plantas de reprocesado. Aquellos convenios especificaban, empero, que el plutonio separado y todos los residuos altamente radiactivos retornarían después a sus países de origen. Rusia ha adoptado, en fecha reciente, una política similar. Por ello, los gobiernos que envíen combustible agotado al exterior necesitan al final preparar lugares de almacenamiento para los residuos nucleares retornados. Tal realidad tardó algo en asimilarse, todos los países que compraron servicios de reprocesado en el extranjero acabaron convencidos de que más les valdría almacenar su combustible agotado y ahorrarse unas cuentas de reprocesado del orden de un millón de dólares por tonelada (10 veces el costo de los contenedores de almacenamiento en seco).

Francia y el Reino Unido han perdido sus clientes extranjeros. De hecho, el Reino Unido planea cerrar sus plantas de reprocesado en los próximos años, una medida que va acompañada de una factura de 92 mil millones de dólares por la descontaminación de los terrenos de las instalaciones. En 2000 Francia consideró la opción de dar por terminado el reprocesado en 2010, convencida de que ello rebajará el precio de la electricidad nuclear. Pero ese cambio podría también generar agrios debates acerca de los residuos nucleares, lo último que la organización nuclear francesa

EN ESPAÑA

Actualmente el combustible agotado se guarda en piscinas localizadas en las centrales. Hay dos excepciones: los materiales de media y alta actividad extraídos del combustible del reactor desmantelado de Vandellós I, reprocesado en Francia, y el uranio y plutonio extraídos del combustible de la central de Santa María de Garoña, reprocesado en el Reino Unido. Por contrato, tienen que volver a España en los próximos años.

De momento, sólo se han llenado las piscinas de la central de Trillo (en 2003). Ahora se está almacenado allí el combustible gastado en seco, en contenedores metálicos. Están a punto de colmarse las piscinas de Ascó y Cofrentes, y habrá que almacenar el combustible gastado de la central de Zorita, que va a desmantelarse. La solución adoptada en el Sexto Plan General de Residuos ▶

Radiactivos, de 2006, es la construcción de un Almacén Temporal Centralizado, un edificio en superficie que, decía el Plan, debería inaugurarse hacia 2010 y funcionar durante unos sesenta años. Allí tendrían que ir a parar las 6700 toneladas de combustible gastado que generarán los reactores españoles a lo largo de toda su vida útil, más el material de Vandellós repatriado y los de desguace de centrales que no puedan ir al cementerio de baja y media-na actividad de El Cabril. La instalación holandesa HABOG es un modelo de referencia para la española.

En última instancia, los residuos deberían acabar en un cementerio geológico profundo.

—La redacción

quisiera en un país que ha visto un activismo antinuclear más bien escaso.

Japón se halla políticamente aún más aferrado al reprocesado: sus empresas nucleares, a diferencia de las de EE.UU., no han sido capaces de conseguir permisos para ampliar sus almacenamientos *in situ*. Hoy Rusia dispone de una planta de reprocesado, con capacidad para hacerse cargo del combustible agotado de sólo el 15 por ciento de los reactores nucleares del país. Los soviéticos se habían propuesto ampliar su potencia de reprocesado pero abandonaron esos planes cuando su economía se hundió en los años ochenta.

Durante la guerra fría, hubo en funcionamiento plantas de reprocesado en los estados de Washington y Carolina del Sur para recuperar el plutonio de las armas nucleares. Más de la mitad del plutonio separado en aquellas labores ha sido declarado sobrante para las necesidades del país, y el Departamento de Energía prevé hoy que deshacerse de él costará más de 15 mil millones de dólares. Quienes trabajaban en los lugares donde tenía lugar el reprocesado se ocupan principalmente de la descontaminación de la suciedad resultante, con un costo esperado de unos 100.000 millones de dólares.

Además de esas operaciones militares, entre 1966 y 1972 funcionó una pequeña instalación civil de reprocesado en el norte del estado de Nueva York. En ella se separaron 1,5 toneladas de plutonio, hasta que cayó en bancarrota y se convirtió en una empresa conjunta federal-estatal de descontaminación, que, según se prevé, necesitará unos 5000 millones de dólares de los contribuyentes.

Con todos los problemas que suponía el reprocesado, cabe preguntarse con razón por qué se siguió adelante pese a todo. En parte se debe a que, durante los años subsiguientes a la puesta en servicio de las primeras centrales nucleares civiles, la Comisión de Energía Atómica de EE.UU. fomentó el reprocesado en el país y en el extranjero, al considerarlo esencial para el futuro de la energía nuclear, pues a la industria le preocupaba quedarse sin combustible (inquietud que desde entonces se ha aplacado).

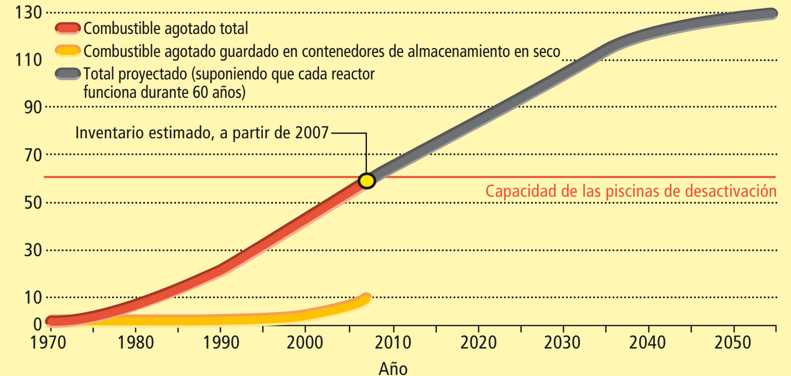
Pero eso era antes de que los problemas de seguridad de la producción de plutonio pasaran de teóricos a reales. En 1974, la India, uno de los países a los que EE.UU. ayudó a prepararse para el reprocesado, empleó su primer plutonio recién separado para construir un arma nuclear. Más o menos por entonces, Theodore B. Taylor, antiguo ingeniero de armamento nuclear, daba la voz de alerta sobre la posibilidad de que la planeada separación y reciclado de millares de toneladas de plutonio al año permitiese a los terroristas robar ese material en cuantía suficiente para construir una o más bombas nucleares.

El plutonio separado es débilmente radiactivo y, por ello, fácilmente transportable; mientras que el plutonio del combustible agotado está mezclado con productos de fisión que emiten rayos gamma, letales. A causa de su poderosa radiactividad, el combustible agotado sólo puede transportarse dentro de unos contenedores que pesan decenas de toneladas, y su plutonio sólo se recupera con grandes dificultades, normalmente tras unos gruesos blindajes con un equipo de manejo remoto muy sofisticado. Por ello, el plutonio no separado contenido en el combustible agotado plantea menos riesgos de caer en malas manos.

Advertidas por el caso de la India sobre el peligro de proliferación de armas nucleares que creaba el reprocesado, las administraciones Ford y Carter reconsideraron la postura de la Comisión de Energía Atómica y concluyeron que el reprocesado era innecesario y dispendioso. El gobierno de EE.UU. abandonó sus planes de reprocesar el combustible agotado de los reactores civiles y apremió a Francia y Alemania para que cancelaran los contratos bajo los cuales estaban exportando técnica de reprocesado a Pakistán, Corea del Sur y Brasil.

Posteriormente, la administración Reagan adoptó la postura contraria a las de Ford y Carter sobre el reprocesado en el país, pero a la industria nuclear de EE.UU. ya no le interesaba. También ella había llegado a la conclusión de que reprocesar para aprovechar

Demasiados residuos, muy pocos almacenes

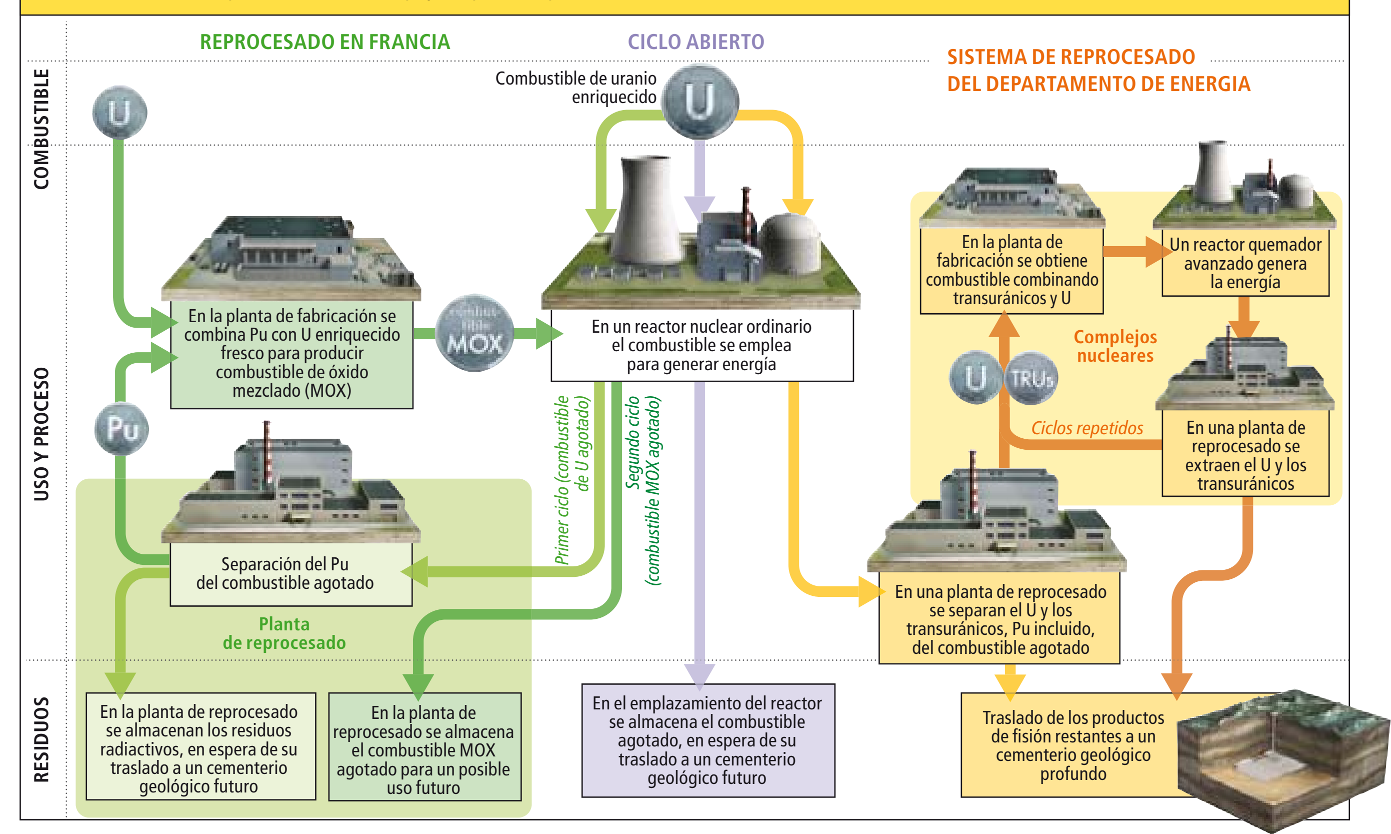


La cantidad de combustible agotado crecerá considerablemente en los próximos decenios, aunque no se construyan más reactores. Las direcciones de las centrales nucleares se ven cada vez más obligadas a transferir el combustible agotado más antiguo contenido en las piscinas de desactivación a contenedores en seco habilitados en las proximidades. No sorprende que la industria esté apremiando al gobierno de EE.UU. para que colabore en la búsqueda de una solución al problema.

LUCY READING-IKKANDA

UTILIZACION DEL COMBUSTIBLE: OPCIONES

Hay varias opciones para gestionar el combustible agotado de los reactores. Puede limitarse a almacenar los residuos tras haber empleado una vez el combustible, tal como ahora hace EE.UU. (*centro*). O puede reprocesar el combustible agotado, separando de éste los componentes que pueden reutilizarse. En Francia, se prepara el plutonio (Pu) para otro ciclo en un reactor (*izquierda*). Otra idea, apoyada por el Departamento de Energía, consiste en reciclar repetidamente el plutonio y otros elementos pesados (los transuránicos) en un nuevo tipo de reactor (*derecha*). La reutilización del combustible agotado parece atractiva porque reduce la cantidad de residuos que necesitan almacenamiento indefinido, pero, advierte el autor (*recuadro abajo a la derecha*), tiene numerosos inconvenientes.



el plutonio recuperado no podría competir económicamente con la utilización del combustible en ciclo abierto. El reprocesado, al menos en EE.UU., había entrado en un callejón sin salida, o así lo parecía.

Reprocesar

La actual administración Bush ha insuflado nueva vida a la idea de reprocesar el combustible agotado, en el marco de la nueva generación de reactores nucleares propuesta. Según ese plan, los transuránicos (el plutonio y otros elementos pesados extraídos del combustible de reactor ordinario) se reciclarían en los nuevos reactores en un proceso reiterado para escindirlos en elementos más ligeros, la mayoría de los cuales tienen unos períodos de semidesintegración más cortos. En consecuencia, la cantidad de residuos nucleares que se necesitaría almacenar sin peligro durante muchos milenios se reduciría [*véase* "Residuos nucleares", por William H. Hannum, Gerald E. Marsh y George S. Stanford; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 2006]. Algunos científicos dicen de ese nuevo proyecto que es "técnicamente goloso", empleando la misma expresión con que en cierta ocasión J. Robert Oppenheimer definió el diseño de la bomba de hidrógeno. Pero, ¿es realmente juicioso?

La propuesta de reciclar el combustible agotado norteamericano no es nueva. A mediados de los años noventa, el Departamento de Energía solicitó a la Academia Nacional de Ciencias de EE.UU. que la sometiese a estudio con vistas a reducir la cantidad de residuos radiactivos de larga vida. El resultado fue un voluminoso informe, *Nuclear Wastes: Technology for Separation and Transmutation* [Residuos nucleares: técnicas de separación y transmutación], muy negativo. El equipo de la Academia concluía que reciclar los transuránicos contenidos en las primeras 62.000 toneladas de combustible agotado (la cantidad cuyo destino habría sido almacenada en el monte Yucca) requeriría "no menos de 50.000 millones de dólares y fácilmente más de 100.000 millones"; en otras palabras, podría costar algo así como 500 dólares por cada ciudadano. Esas cifras tendrían que multiplicarse por dos para atender la cantidad total de combustible agotado que

PUNTO CRITICO

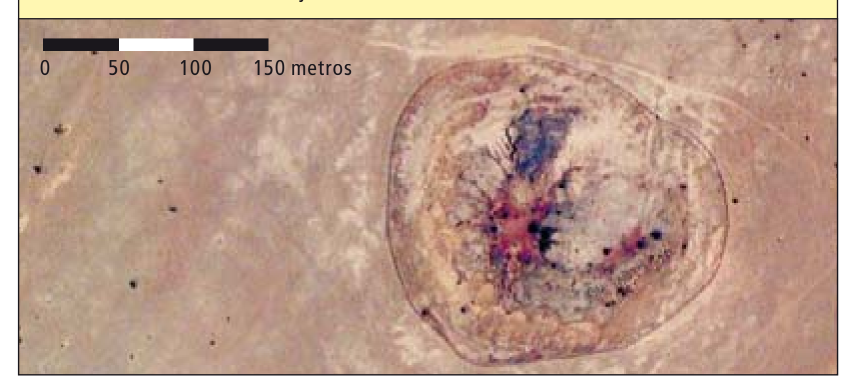
La cantidad de combustible agotado que la industria nuclear de EE.UU. ha acumulado (unas 58.000 toneladas) viene a igualar casi la capacidad de las piscinas de desactivación que se emplean para guardar ese material en los emplazamientos de los reactores. De aquí a cuarenta años, la cantidad se habrá duplicado.

KEVIN HAND

¿Destrucción masiva para las masas?

Lo más inquietante del reprocesado del combustible nuclear agotado es que, al generar grandes cantidades de plutonio, pondría la consecución de bombas atómicas al alcance de naciones descontroladas o incluso de grupos terroristas. Como el plutonio separado es sólo levemente radiactivo, no sería difícil manejarlo (*arriba*) y transportarlo furtivamente. Y para un arma nuclear bastan unos kilogramos.

Antes de que este peligro se valorara plenamente, EE.UU. compartió su técnica de reprocesado de combustible nuclear agotado con otros países. Dejó de hacerlo cuando la India detonó un arma nuclear construida con parte de su plutonio separado. La imagen tomada desde un satélite (*abajo*) muestra el cráter creado por la primera prueba nuclear subterránea de la India en mayo de 1974.



los reactores existentes en EE.UU. se espera que descarguen durante su vida activa.

La razón de tan elevadas cifras es que los reactores ordinarios no valen para esa tarea. Emplean agua para refrigerar y para moderar los neutrones que se emiten cuando se escinden los núcleos del uranio del combustible; la moderación permite que los neutrones provoquen la fisión de otros átomos de uranio 235, creándose y manteniéndose así la reacción nuclear en cadena. Si uno de esos reactores se alimenta con combustible reciclado, se produciría la acumulación de transuránicos pesados (plutonio 242, americio y curio). Como solución se propone un reactor nuclear de un nuevo tipo, en el que los neutrones no se moderan tanto y pueden, pues, fracturar esos átomos cuya fisión requiere más energía.

Durante los años sesenta y setenta, los países más industrializados, incluido EE.UU., dedicaron más de 50.000 millones de dólares de hoy a comercializar ese tipo de reactores de neutrones rápidos, para cuya refrigeración se emplea sodio líquido y no agua. Se los llamó también reactores nodriza, porque estaban ideados para generar más plutonio del que consumían y por ello aprovecharían mucho mejor la energía del uranio. Se esperaba de ellos que sustituyesen rápidamente a los reactores refrigerados por agua ordinarios. Pero los reactores refrigerados por sodio resultaron de construcción mucho más costosa y de explotación mucho más problemática de lo esperado. La mayoría de los países abandonaron su intento de comercializarlos.

Es exactamente ese tipo de reactor fallido el que ahora propone el Departamento de Energía, aunque con un núcleo reconfigurado para que sea consumidor neto de plutonio y no nodriza. EE.UU. tendría que construir de 40 a 75 reactores de 1000 megawatt de ese nuevo tipo para fisionar los transuránicos al ritmo al que se generan en sus 104 reactores ordinarios. Si cada uno de los nuevos reactores refrigerados por sodio costase de 1000 millones a 2000 millones de dólares más que los de refrigeración por agua de la misma capacidad, la subvención federal tendría que estar entre los 40.000 millones y los 150.000 millones de dólares, a sumar a los entre 100.000 millones y 200.000 millones requeridos para construir y explotar la infraestructura de reciclado. Dado el déficit presupuestario de EE.UU., parece improbable que tal programa se lleve a cabo.

Si se construyera una planta de reciclado a escala total (propuesta hasta hace poco por el Departamento de Energía para 2020), pero no se llegase a construir el reactor refrigerado por sodio, casi todos los transuránicos irían a parar sin más a un almacenaje indefinido. En un atolladero así se encuentra el Reino Unido, donde el programa de reprocesado iniciado en los años sesenta ha producido unas 80 toneladas de plutonio separado. Deshacerse de ellas sin peligro costará decenas de miles de millones de libras.

Reprocesar el combustible agotado y luego almacenar indefinidamente el plutonio separado y los residuos nucleares en la planta de reprocesado no es una estrategia de eliminación. Sería más bien una estrategia para el desastre, porque facilita mucho los robos de plutonio separado. En un informe de 1998, la Real Sociedad del Reino Unido, que comentaba el crecimiento de las existencias de plutonio civil en aquel país, advertía de que “es materia de gran preocupación la posibilidad de que, en algún momento, se pudiera acceder a las existencias de plutonio separado con la intención de producir armas ilegalmente”. En 2007, un segundo informe de la Real Sociedad reiteraba que “seguir acumulando un material muy peligroso no es una opción aceptable a largo plazo”.

Es evidente que la prudencia exige no almacenar el plutonio en un centro de reprocesado de forma que cualquiera pueda robarlo. El sentido común dicta que no sea en absoluto separado. Hasta que no se disponga de un basurero duradero, el combustible agotado de los reactores puede permanecer en los emplazamientos de las centrales nucleares que lo generaron.

¿Sería peligroso ese almacenamiento? Aduciría yo que guardar en contenedores de al-

El autor

Frank N. von Hippel, físico nuclear, es profesor de asuntos públicos e internacionales en el Programa sobre Ciencia y Seguridad Global de la Universidad de Princeton. En 1993 y 1994 fue subdirector para la seguridad nacional en la Agencia de la Casa Blanca para Ciencia y Política Tecnológica. Desde 2006 es copresidente de la Comisión Internacional sobre Materiales Fisibles. Ha escrito, solo o en colaboración, varios artículos en *Investigación y Ciencia*.

DEPARTAMENTO DE ENERGIA DE EE. UU. (*arriba*); 2008 DIGITAL GLOBE/GOOGLE IMAGERY (*centro*); CORTESIA DE FRANK N. VON HIPPEL (*abajo*)

macenamiento en seco el combustible gastado que genera el uso en “una dirección” del combustible representa un añadido insignificante al peligro ya existente para la población de los alrededores. Los 10 kilowatt de calor radiactivo generado por las 10 toneladas de combustible de 20 años de edad encerrado en un contenedor de almacenamiento en seco se difunde por convección al caldear el aire que lo rodea. Unos terroristas decididos a causar daño podrían tratar de perforar el contenedor empleando, por ejemplo, un arma antitanque o el motor de un avión lanzado contra él, pero en la mayoría de las circunstancias sólo se dispersaría una reducida masa de fragmentos de combustible radiactivos, y en una zona limitada. En contraste, si en el reactor cercano se cortara el refrigerante, en cuestión de minutos el combustible se sobrecalentaría y empezaría a liberar grandes cantidades de productos de fisión vaporizados. Y si una piscina de almacenamiento de combustible agotado perdiera el agua, el revestimiento de zirconio de las barras de combustible se calentaría hasta la temperatura de ignición en cuestión de horas. Bajo esta perspectiva, los contenedores de almacenamiento en seco parecen más bien benignos.

¿Hay espacio físico suficiente para albergarlos? Pues sí; en las centrales nucleares de EE.UU. hay sitio para más contenedores. Incluso a los reactores más antiguos en servicio en EE.UU. se les están ampliando las licencias para veinte años más, y es probable que se construyan nuevos reactores en las mismas ubicaciones. Así que no hay razones para creer que esas zonas de almacenamiento estén a punto de desaparecer. Al final, desde luego, será necesario retirar el combustible agotado y situarlo en otro lugar, pero no hay que dejarse llevar por el pánico y adoptar una política de reprocesado, que haría mucho más peligrosa y costosa que hoy la situación.

Miedo en Nevada

En EE.UU. el destino a largo plazo de los residuos radiactivos depende de cómo se resuelva el punto muerto en que se encuentra hoy el almacén del monte Yucca. Acerca del lugar hay división de opiniones. Los requisitos normativos son duros: el Departamento de Energía tiene que demostrar que la montaña confinará los residuos durante un millón de años con eficacia suficiente para que las dosis de irradiación en el exterior no alcancen niveles significativos.

Los riesgos derivados incluso de un cementerio mal diseñado no son nada comparados con los derivados de una política que hiciera más accesibles materiales aptos para armas nucleares. Desde esa perspectiva, cuesta entender por qué el peligro de una contaminación nuclear local para dentro de 100.000 o un millón de años ha despertado en EE.UU. una pasión política mucho más intensa que un peligro inminente relativo a armas nucleares.

Parte del problema es la opinión que se tiene en Nevada de que la administración Reagan y el Congreso actuaron injustamente cuando en 1987 suspendieron una evaluación objetiva de otros emplazamientos y designaron el monte Yucca como futuro cementerio nuclear. Para contrarrestar esa impresión, podría ser necesario reiniciar las deliberaciones en torno a un emplazamiento adicional. La Ley sobre Residuos Nucleares de 1987 estipula que el secretario de energía informará al Congreso en 2010 sobre la necesidad de una segunda instalación de almacenaje. Ahora bien, debería considerarse también la posibilidad de establecer para estos asuntos un organismo más especializado y menos politizado que el Departamento de Energía.

Mientras, el combustible agotado puede almacenarse sin peligro en contenedores secos en las centrales. E incluso una vez depositado un cementerio geológico, seguiría siendo recuperable al menos durante un siglo. Así pues, en el caso poco probable de que los beneficios del reprocesado superaran alguna vez a sus costes y riesgos, esta opción seguiría disponible. Pero hoy carece de lógica que nos precipitemos hacia una empresa cara y potencialmente catastrófica sólo por una incierta esperanza en que reduciría el lastre ecológico a largo plazo.

KEVIN HAND

A favor de los contenedores secos

Hasta que se inaugure un cementerio radiactivo geológico profundo, aduce el autor, la industria nuclear de EE.UU. dispone de una alternativa muy válida para almacenar el combustible agotado que se acumula en las piscinas de desactivación: los contenedores secos. Son cilindros de hormigón y metal de 150 toneladas. Pueden guardar 10 toneladas o más de combustible agotado. Situados en los mismos emplazamientos que los reactores, crean un riesgo adicional mínimo comparado con los anejos a las distintas operaciones que ya se efectúan en esos lugares.

Tapa
Respiradero superior
Blindaje de hormigón
Combustible usado
Paramento externo
Recipiente de acero
Placa base
Piso grueso de hormigón
Respiradero inferior

YUCCA AL DIA

El avance del propuesto cementerio nuclear de EE.UU. en el monte Yucca (Nevada) sigue siendo lento. En el mejor de los casos, no se autorizará su construcción hasta 2011 y no estará acabado hasta 2016. Por tanto, la industria nuclear de EE.UU. no empezaría a almacenar combustible agotado allí en él hasta 2017; o después, si la obra se retrasa por polémicas científicas, dificultades legales o falta de fondos.

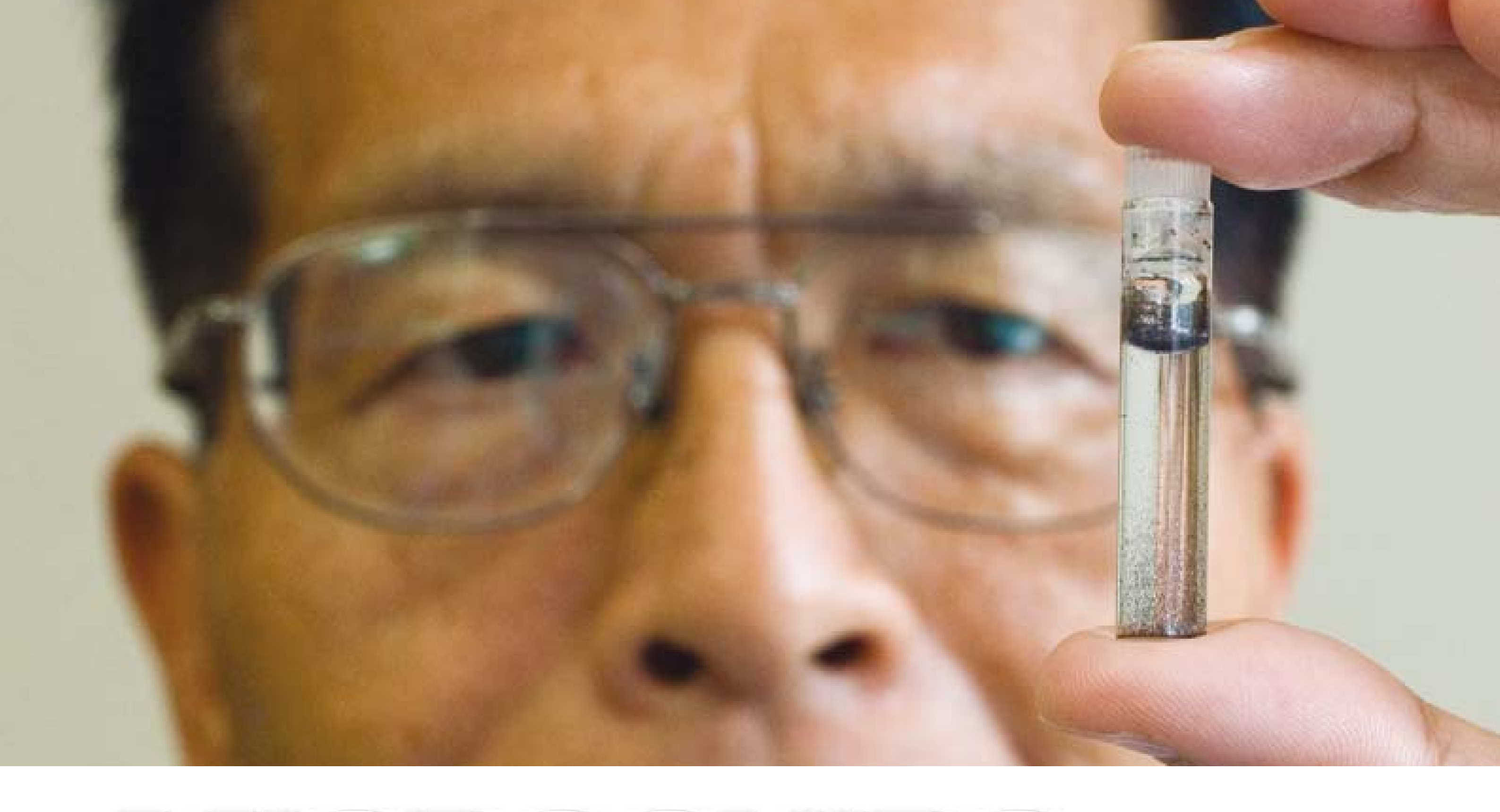


Bibliografía complementaria

NUCLEAR WASTES: TECHNOLOGIES FOR SEPARATION AND TRANSMISSION. National Academies Press, 1996.

THE FUTURE OF NUCLEAR POWER. Estudio interdisciplinar del MIT, 2003. http://web.mit.edu/nuclear power

MANAGING SPENT FUEL IN THE UNITED STATES: THE ILLOGIC OF REPROCESSING. Frank von Hippel en un informe de investigación de la Comisión Internacional sobre Materiales Fisibles, enero 2007.



MICROCHIPS contra

TIM HORNYAK

CONCEPTOS BASICOS

- La aplicación de etiquetas de identificación por radiofrecuencia, una alternativa electrónica a los códigos de barras, se está generalizando. Con ellas se marcan los palés que distribuyen mercancías y los libros de las bibliotecas; resultan insuperables en los sistemas de pago automático en los peajes.
- Hitachi, que ya produce un chip diminuto para esas etiquetas, ha anunciado el prototipo de un chip casi invisible.
- La compañía se propone incorporar el nuevo chip en documentos justificativos de valor (cheques regalo, marbetes y títulos) y así obviar las falsificaciones.

La Expo 2005, la feria internacional celebrada en Aichi, recibió más de 22 millones de visitantes. Ni uno de ellos entró con un boleto falso. Las entradas eran casi imposibles de falsificar porque cada una contenía un diminuto microcircuito, o chip, de IDRF (identificación por radiofrecuencia) —de sólo 0,4 milímetros de lado por 0,06 milímetros de espesor— que transmitía por radiofrecuencia un número identificador a un escáner instalado en los accesos.

Hitachi, el fabricante de aquel chip, se propone ahora obtener un dispositivo todavía menor. En 2007 fabricó un chip de sólo 0,05 milímetros de lado y 0,005 milímetros de espesor. Casi invisible, ese prototipo incorpora las mismas funciones que el de los boletos de la Expo, pero su superficie es sesenta veces menor. Su tamaño, que permite incrustarlo en una hoja de papel, anuncia una era en que los objetos podrán ser discretamente etiquetados y leídos por un escáner con el que no será necesario establecer contacto físico.

En Tokio, el diseñador del chip, Mitsuo Usami, del Laboratorio Central de Investigación de Hitachi, sostiene una pequeña ampolla de líquido. Señala un remolino de partículas y sonríe. Las partículas relucen como polvo de estrellas a la luz del atardecer. “He aquí el chip de esta clase más pequeño del mundo”, afirma.

El encanto de lo pequeño

Antes incluso de semejante achicamiento, las etiquetas de IDRF (tarjetas inteligentes) se tenían por algo revolucionario en los canales de producción y distribución. Más caras que los códigos de barras, ofrecen también mayor eficiencia; la lectura de una tarjeta inteligente de calidad no requiere el escaneo manual, ni una orientación determinada. En los últimos años, los principales minoristas (Wal-Mart, entre otros) las han introducido para recortar gastos en inventario y mano de obra. Otras aplicaciones en auge incluyen el cobro electrónico de peajes, abonos a los transportes públicos y pases. Hay quienes se las han implantado en las manos para facilitarse el acceso al domicilio y a los ordenadores.

Pero la meta principal de Hitachi consiste en aplicar este nuevo chip a las técnicas contra la falsificación. Podría incrustarse en títulos, cheques regalo, papel moneda y otros documentos justificativos de alto valor. Cuanto menor sea el chip, más fácil será disimularlo. A medida que se van abaratando los equipos de técnica depurada, se hace más fácil falsificar lo que está hecho de papel. Aun cuando el dinero electrónico se usa cada vez más, los billetes de banco siguen resultando muy cómodos.

Como otros chips de IDRF “pasivos”, el que se utilizó en la Expo de Aichi (el “mu-



1. **MITSUO USAMI muestra una ampolla que contiene, por millares, minúsculos chips que ha inventado (*motas negras*) para utilizar en las etiquetas de identificación por radiofrecuencia.**

Las tarjetas de identificación por radiofrecuencia se aplican a la rotulación de toda clase de artículos. En versión miniaturizada, servirían también para impedir la falsificación

Tim Hornyak

la FALSIFICACION

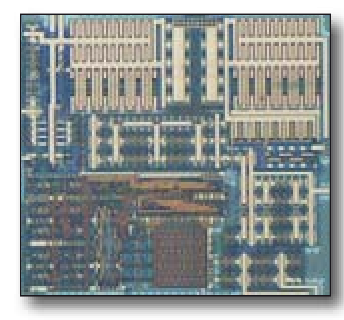
chip", μ-chip) es de funcionamiento sencillo; no requiere pilas ni alimentación de corriente. Cuando se incrusta en un artículo junto con una antena (una pequeña tira de filamento metálico), al recibir desde un escáner microondas de 2,45 gigahertz, responde devolviendo un número identificador de 128 bits guardado en su memoria de sólo lectura (ROM, de "Read Only Memory"). El escáner contrasta el número con una base de datos —ubicada en cualquier lugar del mundo— para autenticar de inmediato el artículo que contiene el chip.

Dado que la arquitectura de 128 bits posibilita un número casi infinito de combinaciones de dígitos (10^{38}), el μ-chip puede emplearse para identificar "billones de billones" de objetos. Por sí mismo, cada número identificador carece de significado, pero cotejado con la entrada en una base de datos recupera toda la información que el usuario haya asignado al chip. El chip en desarrollo de menor tamaño se presenta en forma de polvo. Se denomina LSI "en polvo" ("Powder LSI", de "Large Scale Integrated", integrado a gran escala); almacena un identificador de 128 bits.

El μ-chip y la versión en polvo surgieron a partir de una idea que Usami, experto en diseño de circuitos, esbozó tras contemplar un anuncio de los teléfonos celulares "i-mode" que el gigante japonés de las telecomunicaciones NTT introdujo en 1999. Aquellos primeros aparatos permitían acceder a Internet a través del auricular del teléfono. Usami imaginó toda una red de chips y servidores de IDRF. Los chips se instalarían en pequeños dispositivos; estarían esencialmente vacíos, salvo por un número identificador exclusivo que se transmitiría a un servidor. Recibido un número válido, el servidor proporcionaría las distintas funciones que pudiera desear el usuario. El concepto guarda semejanza con la computación distribuida ("cloud computing") actual, en la que unas aplicaciones no se hallan almacenadas en un solo ordenador, sino que residen en otros lugares y se accede a ellas a través de Internet.

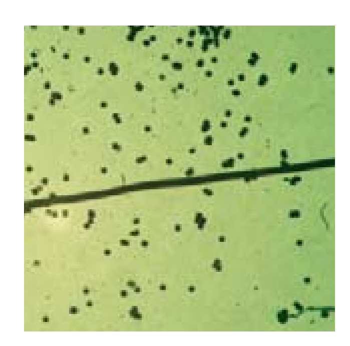
Usami dirigió entonces su atención a la creación de un chip de IDRF tan pequeño, que pudiera incorporarse a cualquier objeto. Su comercialización requería un prototipo barato, sencillo y seguro. A él no le faltaban conocimientos sobre el desarrollo de microchips; a principios de los noventa había diseñado una tarjeta de teléfono ultrafina que en lugar de la banda magnética, llevaba un microchip insertado, que brindaba la seguridad por encriptado. El chip incrustado medía 4 milímetros de lado y 0,25 de espesor.

Pero Usami buscaba algo menor todavía. De entrada necesitaba determinar las funciones



2. **SUPERFICIE DE UN CHIP en polvo aumentada unas 800 veces.**

CORTESIA DEL LABORATORIO CENTRAL DE INVESTIGACION DE HITACHI, LTD.



3. EL TAMAÑO liliputiense de los chips en polvo se evidencia en esta micrografía, que muestra un cabello de una mujer japonesa rodeado de trocitos de silicio del tamaño de esos chips.

mínimas que debería ejecutar el microchip. Recabó la ayuda de su colega Kazuo Takaragi, especialista en seguridad informática, del Laboratorio de Desarrollo de Sistemas de Hitachi. Tras analizar el problema exhaustivamente, Usami decidió que un número identificador de 128 bits bastaría para mantener un diseño sencillo y conseguir a la vez una cifra elevada de combinaciones de dígitos. Ese planteamiento garantizaría también la seguridad, pues la información guardada en la memoria de sólo lectura sería inalterable. Descartó todo lo prescindible: dejó sólo, aparte de la ROM, un circuito simplificado de radiofrecuencia (para interactuar con la antena), un circuito rectificador (para controlar la corriente) y un circuito de reloj (para sincronizar la actividad del chip y coordinarla con un escáner).

Irónicamente, la mayor dificultad que entrañó la obtención del chip minúsculo no fue técnica. Entonces, como ahora, el desarrollo de los microcircuitos tendía hacia el aumento de memoria y funcionalidad. Usami nadaba, pues, contracorriente. Su diseño rebajado chocó con la firme oposición del departamento comercial de Hitachi, interesado en la obtención de un chip de reescritura. Sin el apoyo financiero del departamento, su idea nunca saltaría más allá de la mesa de dibujo.

Le salvó la fortuna en la persona de Shojiro Asai, director general del Grupo de I+D de Hitachi, quien se percató de las posibilidades del proyecto. Decidió financiar la producción del prototipo de lo que se convertiría en el μ-chip (designado así por la letra griega μ con que se representa la micra, o milésima de milímetro). Pero con una condición: Usami debía recuperar todos los costes. La estratagema consistió en ofrecer el chip como medida contra falsificaciones. El éxito en la Expo de Auchi convenció a Hitachi para que dejara a Usami proseguir en su empeño miniaturizador.

Chips en polvo

Los chips en polvo constan de los mismos componentes que el μ-chip, pero se acomodan en un espacio más restringido. La clave para la miniaturización extra fue el empleo de la técnica de 90 nanómetros de silicio sobre aislante (SOI, de "Silicon-On-Insulator"). Se trata de un método avanzado de fabricación de microcircuitos iniciado por IBM y que ahora siguen otros. Los procesadores obtenidos mediante SOI ofrecen mejores prestaciones y consumen menos que los obtenidos por los métodos de fabricación al uso; ello se debe al aislamiento de los transistores. El aislante reduce la absorción de energía eléctrica en el medio circundante —en beneficio de la intensidad de la señal— y a la vez mantiene separados los transistores. Esa separación evita las interferencias entre los transistores y permite que éstos se dispongan más cerca unos de otros, lo que posibilita la reducción del tamaño del chip.

De gran ayuda fue también la litografía por haz de electrones. Con ella se traza un dibujo de cableado que representa el número identificador de cada chip, en un área compacta, mediante la acción de un haz electrónico concentrado. Esta técnica traza los circuitos con mayor lentitud que la fotolitografía, pues genera los dibujos en serie y no en paralelo. Pero Hitachi desarrolló un método de obtención de chips en polvo 60 veces más rápido que el de fabricación del μ-chip.

Las tarjetas de IDRF y los μ-chip constan de chips y antenas externas. Para ciertas aplicaciones, los μ-chip y los pulverulentos necesitarán una antena interna, incrustada. Se acorta así la distancia a la que debe situarse el escáner. La distancia máxima de escaneo de los μ-chip comerciales de Hitachi es de 30 centímetros, la misma que la del prototipo en polvo, aunque corta, aceptable para la mayoría de las aplicaciones relacionadas con efectivo o valores.

La compañía está investigando con la mente puesta en el aumento del alcance de las antenas, externas e internas. La aplicación determinará el alcance requerido: el efectivo y los valores necesitarían sólo algunos milímetros o un centímetro; la clasificación de paquetes, alrededor de un metro. Asimismo, la firma está desarro-

APLICACIONES DE LOS CHIPS EN POLVO

El chip en polvo de IDRF de Hitachi podría embeberse en papel moneda, títulos, marbetes y similares para cortar el paso a las falsificaciones. Imagínese una

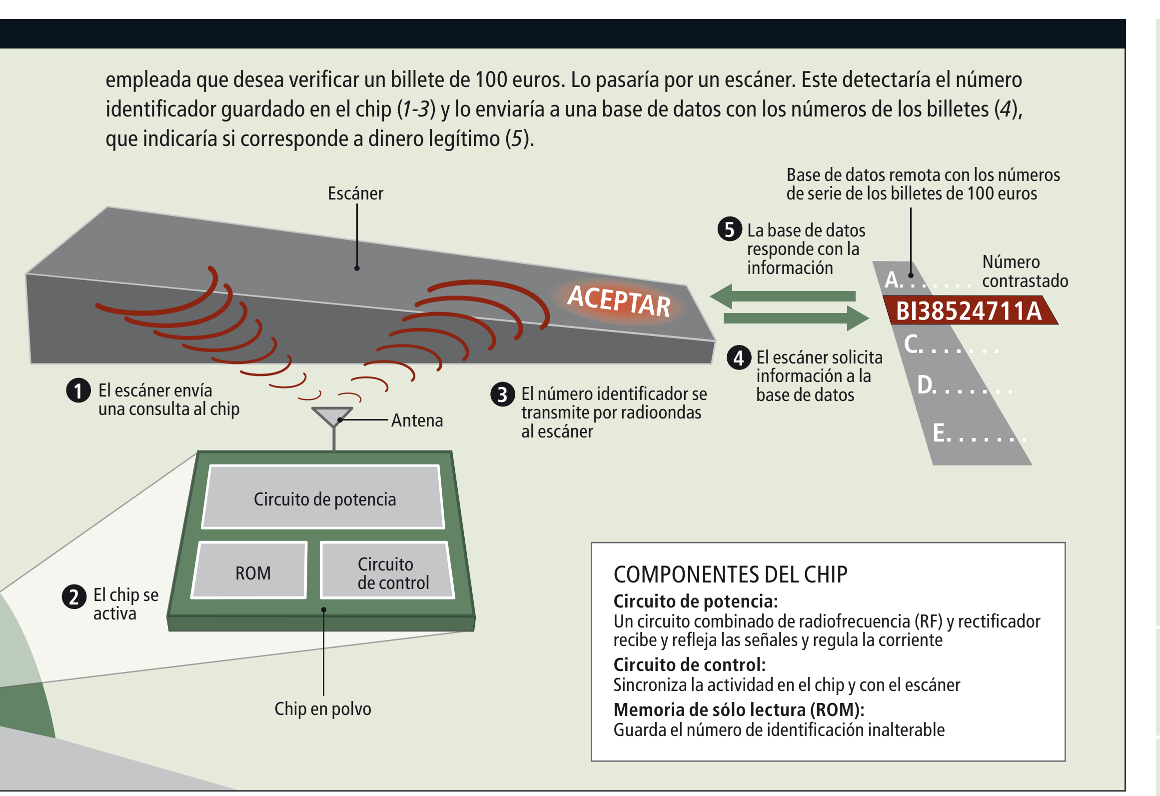


El autor

Tim Hornyak es autor de *Loving the Machine: The Art and Science of Japanese Robots* (Kodansha International, 2006).

CORTESIA DEL LABORATORIO CENTRAL DE INVESTIGACION DE HITACHI, LTD. (*chips en polvo*)

empleada que desea verificar un billete de 100 euros. Lo pasaría por un escáner. Este detectaría el número identificador guardado en el chip (*1-3*) y lo enviaría a una base de datos con los números de los billetes (*4*), que indicaría si corresponde a dinero legítimo (*5*).



TAMAÑOS RELATIVOS

Un chip estándar de una etiqueta de IDRF "pasiva" (sin pilas) para libros de biblioteca podría medir de uno a dos milímetros de lado (como la sección transversal de un lápiz del número 2 no afilado). El *μ*-chip de Hitachi tiene una superficie inferior a un cuarto de ésa; el chip en polvo es del orden de 64 veces menor que el *μ*-chip.

Ampliación

Chip identificador de libros
Tamaño real:
1 mm × 1 mm × 0,18 mm

***μ*-Chip**
Tamaño real:
0,4 mm × 0,4 mm × 0,06 mm

Chip en polvo
Tamaño real:
0,05 mm × 0,05 mm × 0,005 mm

Para facilitar la visibilidad, se ha decuplicado el tamaño de las figuras.

llando una técnica "anticolisión" que permitiría la lectura simultánea de múltiples chips, lo cual facilitaría el escaneo de los artículos que se agrupan en la estantería de un almacén o se amontonan en la cesta de la compra.

¿Un hermano pequeño?

Dotar de chips de IDRF al dinero constituiría una aplicación lógica de estos microcircuitos. Pero podría provocar suspicacias de invasión de la privacidad; el uso de la técnica de IDRF evoca el fantasma de alguien sin escrúpulos escudriñando desde lejos nuestro billetero. Con unas etiquetas para escáner de corto alcance, como los lectores de los cajeros automáticos, se limitarían dichas intrusiones. Además, el delincuente necesitaría acceder al servidor y base de datos adecuados para que la información tuviera algún valor.

El tamaño infinitesimal de los chips LSI en polvo evoca escenas de fantasía científica. ¿Podría la policía rociar de polvo una multitud de alborotadores y rastrearlos luego a través de escáneres de seguridad distribuidos por carreteras y transportes públicos? Hitachi asegura que resulta inviable desplegar los chips por rociado; para funcionar, deben estar unidos a antenas. Numeroso grupos cívicos han desarrollado pautas para proteger la privacidad frente a la IDRF. Una de las principales normas para esa técnica es no usarla de forma subrepticia.

El periódico londinense *The Guardian* ha destapado, sin embargo, un caso polémico sobre la cadena de supermercados Tesco, que ensayó la venta de cuchillas de afeitar empaquetadas con unas etiquetas IDRF que activaban una cámara oculta en caso de intento de robo. Aunque los defensores de la privacidad reconozcan las ventajas de la IDRF para el transporte y venta de mercancías, consideran que debe eliminarse o anular la etiqueta "antirrobo" una vez adquirido el artículo.

Usami opina que las ventajas potenciales de la IDRF superan los riesgos. Por botón de muestra: etiquetas de IDRF incrustadas en las baldosas de las aceras y los pasos de peatones facilitarían la operación de los sistemas de navegación de las silla de ruedas (una aplicación de sumo interés en sociedades envejecidas como la japonesa). Cuando se reduzca el uso del papel, los chips de IDRF vendrán muy bien en situaciones en que el tamaño, el acceso y la complejidad constituyan factores limitantes.

Hitachi imagina para el futuro emplear los chips en polvo para reducir el tiempo de instalación y verificación de sistemas complejos de cableado en empresas, fábricas y otras instalaciones. Cables y terminales estarían dotados de chips que los operarios comprobarían rápidamente con una base de datos y los esquemas correspondientes, en vez de confiar en interminables inspecciones visuales.

Con todo, no les falta razón a quienes les preocupa que los microcircuitos sean cada vez más difíciles de localizar. La tendencia a la miniaturización continuará.

MELISSA THOMAS

Bibliografía complementaria

SISTEMAS DE IDENTIFICACION POR RADIOFRECUENCIA. Roy Want en *Investigación y Ciencia*, n.º 330, págs. 40-49, marzo 2004.

HITACHI ACHIEVES 0,05-MM SQUARE SUPER MICRO RFID TAG, "FURTHER SIZE REDUCTIONS IN MIND". Disponible en http://techon.nikkeibp.co.jp/english/NEWS_EN/20070220/127959/

RFID Journal: www.rfidjournal.com

El arco, maravilla técnica

¿A qué se debe el éxito del arco? A su simplicidad como arma y a la asombrosa eficacia con la que comunica su energía a la flecha

Jean-Michel Courty y Edouard Kierlik

Hoy deporte olímpico, emblema de ademanes gráciles y pacíficos, el tiro con arco fue largo tiempo una actividad temible. Hasta la aparición de los mosquetes y arcabuces, ninguna otra arma de impulsión lo igualaba. De manejo sencillo y rápido, comunica a la flecha una energía considerable. ¿Por qué son tan eficientes en el arco la acumulación de energía y su entrega al proyectil?

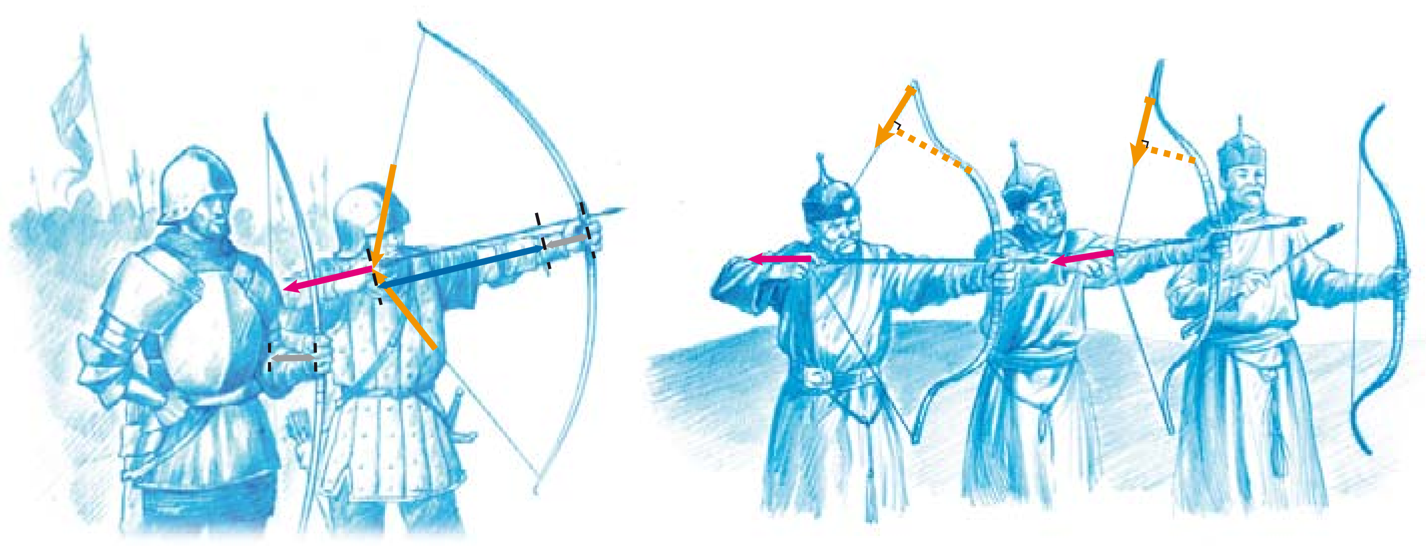
El arco es más rápido y ligero que la catapulta y el trabuco, ingenios que hacen uso de la energía potencial gravitatoria de un contrapeso de gran masa al que previamente hay que elevar. Es más preciso y necesita menos espacio que la honda, en la cual la energía se acumula haciendo girar cada vez más rápido el proyectil. El movimiento para armar el arco es simple: al tirar de la cuerda, el arquero flexiona las palas del arco y la energía de deformación elástica así almacenada está lista para ser cedida a la flecha.

El valor de esa energía depende sólo de magnitudes fisiológicas: la apertura real del arquero (la amplitud del movimiento de su mano cuando tiende la cuerda) y la fuerza máxima que es capaz de ejercer (y, sobre todo, de mantener), durante el breve tiempo necesario para apuntar adecuadamente. Suponiendo que el arquero aplicase la misma fuerza durante toda su acción, la energía almacenada sería igual al producto de esa fuerza por la apertura real. Para un arquero entrenado de talla media, esa apertura, determinada por la medida de los brazos, es de unos 70 centímetros; la fuerza máxima se acerca a las 50 libras según la unidad consagrada en arquería, o sea, unos 222 newton. La energía máxima almacenada en el arco sería entonces de 156 joule, valor que vamos a considerar óptimo.

Un arco recurvado disminuye el esfuerzo

En realidad, la fuerza ejercida por el arquero no es constante. Inicialmente nula, crece hasta alcanzar su valor máximo al final del movimiento de la mano. Cuando se tiende un arco recto (como el *longbow* inglés, que destrozó a la caballería francesa en Crécy en 1346), la fuerza ejercida es proporcional a la amplitud del movimiento, igual que en los resortes. Por ello, la energía acumulada es la mitad de la óptima, 78 joules en nuestro ejemplo, bastante para proyectar una flecha de 20 gramos a casi 320 kilómetros por hora.

¿Cómo superar al arco recto y acercarse a la energía óptima? Con un arco recurvado, llamado "recurvo", como el que utilizan los arqueros modernos y ya usaban los persas de la Antigüedad. Gracias a la forma curvada, la fuerza antagonista de la cuerda aumenta deprisa al



1. La apertura real de un arco es la distancia en que la cuerda se separa de su posición inicial cuando el arquero lo arma, o apresta para el tiro (*azul oscuro*). La energía almacenada depende de esa distancia y de la fuerza ejercida (*en rojo; las flechas naranja indican la tensión de la cuerda*) para tensar el arco. En un arco recto, esa energía es igual a la mitad de la óptima (producto de la apertura real por la fuerza máxima).

2. Cuando se arma un arco recurvado, aumenta el brazo de palanca (*trazo discontinuo*) de la fuerza (*trazo lleno naranja*) que la cuerda ejerce sobre el arco, con lo que se reduce el esfuerzo del arquero, pues la fuerza que tira de la cuerda aumenta muy lentamente con la apertura. El brazo de palanca se ejerce en un punto situado hacia el centro de la pala del arco, lugar donde éste opone menos resistencia.

comienzo de la apertura y mucho más lentamente al final del movimiento.

En ausencia de la cuerda, el arco está curvado por sus extremos en sentido contrario a la empuñadura. Hay que ejercer un esfuerzo considerable para encordarlo (montar la cuerda). La cuerda se halla sometida a una intensa fuerza, ya antes de que el arquero empiece a armar el arco. Al iniciarse la apertura, la parte de la cuerda próxima a los puntos de fijación está en contacto con las palas del arco. A medida que se extienden, la cuerda se separa del arco y el punto de contacto de la cuerda con la pala se aleja del eje materializado por la flecha. El brazo de palanca de la fuerza ejercida por la cuerda sobre el arco se alarga (*figura 2*). Entonces, para un mismo valor del momento aplicado (producto de la fuerza por su brazo de palanca), la fuerza será menor. Por ello, en comparación con un arco recto, la fuerza necesaria para tensar el arco recurvo aumenta sólo moderadamente durante la apertura.

En la práctica, los arcos recurvos permiten acumular un 40 por ciento más de energía que los arcos rectos y llegan al 70 por ciento de la energía optima. Para la misma energía almacenada, un arco recurvo es más pequeño que un arco tradicional. Más manejable, desde un caballo su empleo resulta más fácil. No nos extraña, pues, que fuese el arma preferida de las hordas mongolas. De invención moderna, el arco de poleas, o compuesto, como también se le conoce, funciona aún mejor. Merced a las poleas montadas en los extremos del arco, la fuerza de tracción disminuye considerablemente al final del movimiento, hasta llegar a ser sólo el treinta por ciento de la fuerza máxima. Son arcos muy potentes, que para ser armados necesitan transitoriamente una fuerza elevada, pero en la fase final mantener la tensión no cuesta mucho, lo cual permite apuntar muy cómodamente.



3. Cuando se suelta la cuerda, ésta se acelera hasta su posición rectilínea. A la vez, la velocidad del extremo del arco disminuye hasta anularse: toda la energía cinética está concentrada en la cuerda y en la flecha en el instante en que ésta es impulsada, y de ahí la eficacia de la transferencia de energía.

BRUNO VACARO

¿Cuánta energía se lleva la flecha?

Una vez acumulada la energía, la mayor parte de ésta debe cederla el arco a la flecha. Ahora bien, si el proyectil se lleva toda la energía, es que el arma no conserva ninguna: ni energía de deformación ni energía cinética. En el instante en que el proyectil sale, el sistema propulsor debe encontrarse inmóvil y en su posición de reposo. La observación de un lanzador de jabalina nos revela la dificultad de la tarea: al final de su movimiento, la mano lleva la misma velocidad que la jabalina. Para comunicar energía al proyectil, un lanzador de peso o de jabalina desperdicia energía acelerando su cuerpo o su brazo. Por su parte, los arcos modernos transfieren a la flecha hasta el 80 por ciento de la energía que almacenan.

¿De qué procede esa eficacia? Examinemos la velocidad de los distintos componentes del arco en el momento en que la flecha lo abandona, es decir, cuando la cuerda pasa por su posición rectilínea. Fijémonos primero en la parte móvil de mayor masa, o sea, las palas, y reproduzcamos a cámara lenta la situación. Con una mano tomemos un arco, con la otra mano agarremos la cuerda por el centro y tiremos de ella hacia nosotros algunos centímetros. La cuerda adquiere forma de V, las palas se deforman y los puntos de fijación al arco se acercan. Para simular el fin del tiro, devolvamos la cuerda a velocidad constante a su posición inicial y, a efectos demostrativos, prosigamos el movimiento empujando la cuerda hacia la empuñadura. Cuando la cuerda se acerca a su posición rectilínea, la distancia entre los dos puntos de fijación de la cuerda aumenta; al rebasarse esa posición, el arco vuelve a tensarse y la distancia en cuestión disminuye.

Por tanto, en el preciso instante en que la cuerda llega a su posición rectilínea, la velocidad relativa entre los dos puntos de fijación es nula. Se trata, para ser exactos, de la velocidad vertical, pero puede comprobarse que la velocidad horizontal de las palas del arco es asimismo nula en ese momento. En otras palabras, en el momento en que se suelta la flecha, las palas del arco están inmóviles, mientras que la cuerda, y he aquí el meollo, no lo está.

La cuerda es así la única parte móvil del ingenio en el momento en que sale la flecha. Si las palas son perfectamente elásticas, toda la energía acumulada se recupera en forma de una energía cinética que se reparte entre la flecha y la cuerda de forma directamente proporcional a sus masas. Una flecha pesa unos 20 gramos, una cuerda 6 gramos. Teniendo en cuenta que las diferentes partes de la cuerda no tienen la misma velocidad, la masa "efectiva" de la cuerda se divide por tres, lo que da dos gramos. O sea, la flecha recupera cerca del 90 por ciento de la energía almacenada. Para felicidad de los arqueros, los efectos parásitos, como la elasticidad de la cuerda, sus vibraciones o las del arco cuando se dispara apenas si repercuten en las prestaciones. Llena de energía, la flecha parte hacia el blanco. ¿Lo alcanzará?

Piensa un número

Un truco de adivinación de números de Lewis Carroll nos sirve de excusa para reflexionar acerca de la "irrazonable efectividad de las matemáticas en las ciencias naturales"

Juan M. R. Parrondo

A: "Piensa un número."
B: [Piensa el 23].
A: "Multiplícalo por 3. ¿El resultado es par o impar?"
B: [Obtiene 23 x 3 = 69]. "Es impar."
A: "Súmale 31 o 35, lo que prefieras, y divídelo entre 2."
B: [Suma 31 y obtiene (69 + 31)/2 = 50].
A: "Multiplícalo por 3 y dime si el resultado es par o impar."
B: [Obtiene 50 x 3 = 150]. "Es par."
A: "Súmale 80 o 100, lo que prefieras, y divídelo entre 2."
B: [Suma 100 y obtiene 250/2 = 125].
A: "Ahora añádele el número que pensaste al principio seguido de una cifra cualquiera."
B: [Añade al 23 un 7 y obtiene 237 + + 125 = 362].
A: "Divide el resultado entre 7, desechando el resto."
B: [Obtiene 51].
A: "Vuelve a dividir entre 7, desechando el resto, y dime el resultado."
B: "El resultado es 7."
A: "Pues bien, el número que pensaste es 23."

Este pequeño diálogo es una versión, corregida y simplificada, de una nota que escribió Lewis Carroll en febrero de 1896, dos años antes de su muerte. Sorprendentemente, a pesar de lo intrincado de las operaciones y de la arbitrariedad de algunas de ellas, es posible siempre reconstruir el número original a partir de la información que proporciona B: la paridad de dos de los resultados parciales y la cifra final.

Observen que, para que el truco funcione, es necesario que el "ruido" introducido cuando B suma cantidades elegidas por él (31 o 35 para resultados impares, 80 o 100 para los pares) o cuando añade una cifra cualquiera al número original, no haga que se pierda a lo largo del cálculo la información acerca del número pensado inicialmente. Esto probablemente no extrañe a muchos lectores. Las últimas divisiones entre 7 hacen desaparecer el efecto de estas sumas. Veámoslo en un ejemplo similar. Tomen un número cualquiera x; si añadimos una cifra y a la derecha, el número que resulta es $10x + y$; sumando este número al inicial obtenemos $11x + y$. Si ahora dividimos por 11 despreciando el resto, volvemos a obtener x, puesto que y es menor que 11. La adición de la cifra desconocida es un cierto "ruido" que, sin embargo, desaparece en el cómputo final, debido a que hemos amplificado mucho la "señal" x antes de añadir dicho ruido.

El método de adivinación de Carroll se basa, en buena medida, en esta propiedad matemática, pero es menos trivial, ya que utiliza también información acerca de la paridad de los resultados parciales del cálculo. Se puede comprobar que estas paridades dependen sólo de cuán lejos está de ser múltiplo de 4 el número original.

Podemos ver en la tabla siguiente cómo evoluciona el cálculo según sea el número inicial x un múltiplo de 4 más 1, 2, 3 o 4. En la tabla he indicado en amarillo los resultados impares y en rojo los pares, en los pasos en que la paridad se revela a A. Muestro los posibles resultados después de cada paso. Si éstos son más de dos, especifico, separados por comas, el máximo y mínimo de los posibles valores. Por ejemplo, el sexto paso (sumar el número original x con una cifra añadida y, es decir, sumar $10x + y$), aplicado a un número entre $9n + 109$ y $9n + 134$ (cuarta columna $x = 4n + 4$), puede dar, como mínimo, $9n + 109 + 10(4n + 4) = 49n + 149$ (es el caso en que $y = 0$) y, como máximo, $9n + 134 + 10(4n + 4) + 9 = 49n + 183$ (es el caso en que $y = 9$).

Como ven, el resultado final, junto con la paridad de los resultados parciales, determina unívocamente el número original. Para el elegido por B, 23, el resultado ha sido: impar, par y 7. Por lo tanto, nos encontramos en la tercera columna ($x = 4n + 3$), n será $7 - 2 = 5$ y el número pensado $4 \times 5 + 3 = 23$.

La versión original del Carroll es diferente y además incorrecta, según ha señalado y corregido el matemático R. F. McCoart. Mi versión es también ligeramente distinta de la propuesta por McCoart. No

x	$4n + 1$	$4n + 2$	$4n + 3$	$4n + 4$
Multiplica por 3	$12n + 3$	$12n + 6$	$12n + 9$	$12n + 12$
Regla par/impar	$6n + 17$ o $6n + 19$	$6n + 43$ o $6n + 53$	$6n + 20$ o $6n + 22$	$6n + 46$ o $6n + 56$
Multiplica por 3	$18n + 51$ o $18n + 57$	$18n + 129$ o $18n + 159$	$18n + 60$ o $18n + 66$	$18n + 138$ o $18n + 168$
Regla par/impar	$9n + 41$, $9n + 46$	$9n + 80$, $9n + 97$	$9n + 70$, $9n + 83$	$9n + 109$, $9n + 134$
Suma $10x + y$	$49n + 51$, $49n + 65$	$49n + 100$, $49n + 126$	$49n + 100$, $49n + 122$	$49n + 149$, $49n + 183$
División por 7	$7n + 7$, $7n + 9$	$7n + 14$, $7n + 18$	$7n + 14$, $7n + 17$	$7n + 21$, $7n + 26$
División por 7	$n + 1$	$n + 2$	$n + 2$	$n + 3$

ha sido fácil encontrar esta versión simplificada. Hay que elegir cuidadosamente los números que se suman para que el resultado final y la paridad de los resultados parciales determinen unívocamente el número pensado.

Consideren ahora este otro "truco" de adivinación. Piense un número x de 50 a 150. Deje caer una piedra desde esa altura, medida en centímetros, al suelo y compute el tiempo que tarda en caer. Deje caer ahora la piedra desde un metro de altura y mida de nuevo el tiempo. Divida el primero de los tiempos entre el segundo y dígame el resultado y. El número pensado será $x = y^2$. La razón estriba en lo siguiente: la altura desde la que se deja caer un objeto es proporcional al cuadrado del tiempo que tarda en caer. Observen que el truco no se basa en un mero cómputo del tiempo empleado, es decir, en haber medido con anterioridad los tiempos de caída desde todas las posibles alturas. De hecho, nuestro método de adivinación funcionaría en la superficie de cualquier planeta.

En este ejemplo, nuestra capacidad adivinatoria no es consecuencia únicamente de las reglas de manipulación de símbolos matemáticos, sino también de cómo caen los cuerpos en la superficie de un planeta, obedeciendo las leyes de Newton. De todas las relaciones posibles entre altura h y tiempo t de caída, la naturaleza ha elegido que h sea proporcional a t^2. ¿Es realmente una elección arbitraria? ¿Podría existir un universo en donde h fuera proporcional a t^3? La aspiración de muchos físicos es precisamente demostrar que las leyes que rigen el comportamiento del universo son las únicas posibles, determinadas por pura coherencia lógica. Una variante de esta idea ha dado lugar a grandes avances científicos. Por ejemplo, las geometrías no euclídeas son lógicamente coherentes pero, cuando se "inventaron", no había prueba alguna de que pudieran existir en la naturaleza espacios no euclídeos de dimensión mayor que 2. Alguien pudo haberse preguntado entonces: ¿por qué la naturaleza eligió la geometría euclídea y cómo sería el mundo si la elección hubiera sido otra? Años más tarde, Einstein demostró que el espacio deja de ser euclídeo en los lugares donde hay un campo gravitatorio.

Si hubiera una necesidad lógica en que la altura h fuera proporcional a t^2, podríamos decir que la "adivinación newtoniana" sería similar a la "adivinación carrolliana", aunque más compleja y con la lógica interna del mundo físico. Pero, ¿por qué el universo tendría que ser lógico o disponer de una estructura matemática? En otras palabras, ¿por qué la matemática es tan eficaz para describir el mundo físico, hasta el extremo de poder determinar unívocamente su comportamiento?

Las posturas dentro del mundo de la física y la matemática ante estas preguntas son múltiples. Algunos piensan que el universo tiene una estructura intrínsecamente matemática. Otros, siguiendo a Arthur S. Eddington, opinan que la estructura matemática proviene de nuestra forma de percibir y pensar el mundo. Eddington afirmaba que toda la física se podía deducir de forma lógica, analizando las estructuras de nuestra percepción y nuestro pensamiento. Para ilustrar su argumento utilizaba el ejemplo siguiente: unos hombres fueron a pescar al mar con una red; después de examinar lo que habían capturado en varios lugares y condiciones, concluyeron que los peces tenían un tamaño mínimo de cinco centímetros. Sin embargo, para llegar a esa conclusión no hace falta salir en barca ni echar las redes, sino sólo medir los agujeros de la red (que tienen, obviamente, 5 centímetros de lado). Del mismo modo, para deducir toda la física, bastaría, según Eddington, analizar la forma en que percibimos y categorizamos el mundo.

Eugene Wigner sostenía una postura más modesta. No pensaba que todos los aspectos del mundo físico pudieran ser descritos de forma matemática, pero sí veía en las matemáticas una herramienta fundamental para revelar la verdadera naturaleza del universo. Escribió en 1960 un famoso artículo, *La irrazonable eficacia de las matemáticas en las ciencias naturales*, en el que concluía: "que las matemáticas sean el lenguaje apropiado para formular las leyes de la física es un milagro y un don maravilloso que no entendemos ni merecemos".

Es difícil decantarse por una u otra opción. En cualquier caso, estas reflexiones son un buen modo de despedirme de ustedes. En estos siete años de *Juegos Matemáticos,* hemos explorado juntos muchas curiosidades matemáticas o aplicaciones insospechadas al comportamiento humano o social, y también en ocasiones hemos discutido sus limitaciones. Ya sean un mero producto de la mente humana, una realidad más allá de nuestro pensamiento y de la realidad física, o la lógica interna del mundo físico, las matemáticas no dejan de fascinarnos. Todo lo relacionado con las matemáticas que me ha parecido interesante o curioso a lo largo de estos años, y que pudiera explicarse en un lenguaje accesible, ha aparecido en estas páginas. Espero haber despertado en ustedes el mismo interés y fascinación. Les agradezco también todos los comentarios, sugerencias y muestras de aprecio que me han hecho llegar en todo este tiempo, y les pido disculpas si en alguna ocasión no he podido contestar con la profundidad y la atención que merecían.

Quedaba pendiente una pregunta del mes pasado. La solución al "problema lógico más difícil de la historia" en dos preguntas. Sólo tiene solución si el dios de la Confusión elige *a priori* decir la verdad o la mentira (es decir, no elige al azar la respuesta, sino su propio comportamiento al contestar). En este caso, la pregunta (1) al dios A debería ser: "Responderías "ja" a la siguiente pregunta (2): "¿es cierta al menos una de las siguientes afirmaciones: a) vas a responder "da" a la pregunta total (1) y B es el dios de la Verdad, b) B es el dios de la Mentira?"

Supongan, por ejemplo, que "ja" es sí, A es el dios de la Mentira y B el de la Verdad. Si A respondiera "da" a (1), la afirmación a) sería cierta, con lo que la respuesta de A a (2) sería "da" (no). Entonces (1) sería falsa y A, que ha contestado "da" (no), ha dicho la verdad. Si A responde "ja" a (1), ahora a) y b) son ambas falsas, con lo que A respondería "ja" a (2), y habría dicho la verdad al responder "ja" (sí) a (1). O sea, que A no puede mentir, conteste lo que conteste, y, en consecuencia, le estalla la cabeza. Con un poco de paciencia, pueden comprobar que, independientemente del significado de "da" y "ja" y de si A pretende decir la verdad o la mentira, si le explota la cabeza, entonces B es el dios de la Verdad; si la respuesta de A a (1) es "ja", entonces B es el dios de la Mentira; y si es "da", entonces B es el dios de la Confusión.

Por lo tanto, con la pregunta (1) obtenemos la personalidad de B. Si han llegado hasta aquí entendiendo todo este galimatías, no les costará formular la segunda pregunta. Basta utilizar una construcción del tipo "¿responderías "ja" si te preguntara q? La respuesta a esta pregunta, como ya vimos el mes pasado, es "ja" si q es cierta y "da" si q es falsa, independientemente de la personalidad del dios interpelado.

Azoteas verdes

Cubiertas con vida

Mark Fischetti

Para mitigar diversos problemas urbanos, numerosos municipios están fomentando la instalación de azoteas "verdes", ecológicas. Las cubiertas vegetales, los arbustos y otra flora plantados en la azotea de un edificio reducen la escorrentía de las aguas de tormenta, lo que alivia la carga sobre el alcantarillado y las plantas de tratamiento de agua. Asimismo, la vegetación mantiene la techumbre más fresca durante el verano; ello rebaja la factura del aire acondicionado y, por tanto, los picos de demanda sobre las centrales eléctricas de la zona.

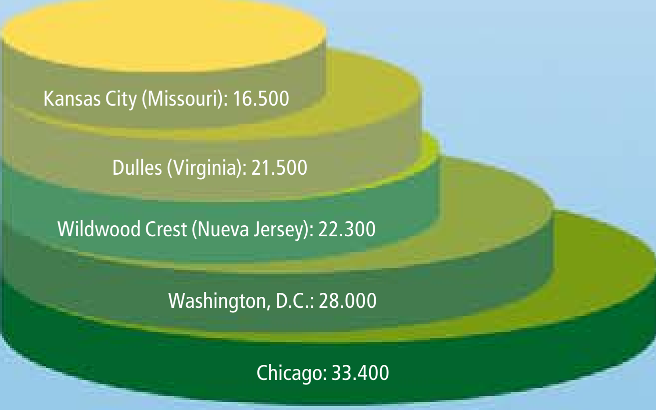
Las azoteas verdes florecen en Europa desde hace diez años. En Tokio ya se exige que al menos el 20 por ciento de las azoteas nuevas de los edificios de tamaño medio y grande sean vegetales. En EE.UU., Chicago es el líder. La mayoría de las instalaciones pertenecen a edificios de nueva construcción, aunque crece la tendencia a remodelar los viejos.

Las cubiertas constan de una sucesión de capas que abarcan la azotea entera o parte de ésta. Las azoteas "extensivas", espesor reducido, incluyen unos siete u ocho centímetros de material arcilloso. Saturadas, pesan de 75 a 125 kilogramos por metro cuadrado; sostienen plantas de porte breve. Las azoteas "intensivas" son más gruesas, más pesadas y más caros su instalación y mantenimiento; sin embargo, sustentan macizos de flores, arbustos e incluso árboles. "Conforme las plantas se hacen más exigentes, las capas deben ser más robustas, con mejores drenaje y aireación", explica Jeff Stillman, de Zinco USA, el primer suministrador mundial de componentes para azoteas verdes.

Otra opción consiste en ensamblar, a modo de piezas de un rompecabezas, módulos prefabricados que contienen capas similares. De instalación más fácil, resultan también más caras y, con el tiempo, se abren las juntas.

El inconveniente principal es siempre el precio. Algunas azoteas —las antiguas, sobre todo— podrían ceder ante el peso. Las compañías de seguros podrían considerar que las azoteas verdes pueden causar daños por estancamiento del agua, con lo que debería modificarse la póliza para que cubriera los desperfectos. Las azoteas extensivas son poco exigentes: les basta un mantenimiento mínimo y dosis ocasionales de abono de acción retardada. Las azoteas intensivas requieren, en cambio, una atención continua. Pero unas y otras convierten una terraza yerma y calurosa en un agradable espacio apto para tomar café, almorzar, tomar el sol o simplemente respirar aire fresco.

AZOTEAS VERDES INSTALADAS EN EE.UU. EN 2006 (metros cuadrados)





TERRAZA AJARDINADA con vistas al Tokio residencial.

GEORGE RETSECK (*página opuesta*); DANIELA NAOMI MOLNAR (*esta página*); REUTERS/CORBIS (*fotografía*); FUENTE DE LOS DATOS: GREEN ROOFS FOR HEALTHY CITIES

¿SABIA USTED QUE...?

➤ **LIMPIEZA:** Rara vez se emplea tierra como suelo de crecimiento. Pesa demasiado y se apelmaza con las lluvias repetidas, lo que reduce la retención de agua y la aireación de las raíces de las plantas. Se prefieren materiales artificiales: pizarra o arcilla molida, que se calientan hasta que forman bolsas de aire y luego se enfrían. Como nutrientes se añaden compost y abono.

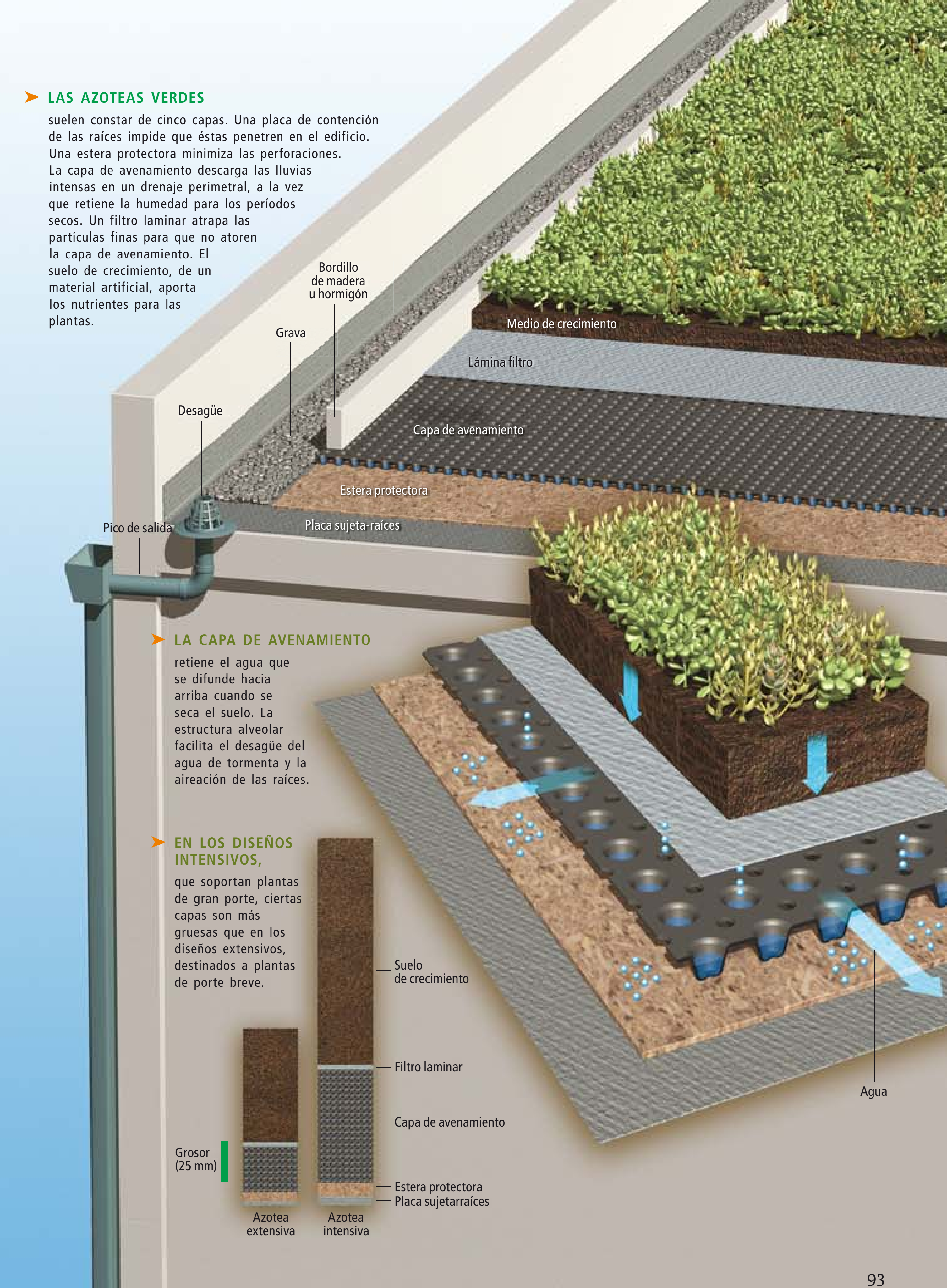
➤ **MEJOR CLIMATIZACION:** En un día soleado de 25 ºC, un techo alquitranado o pintado de negro rebasa los 80 ºC; un techo blanco, llega a los 50 ºC; un techo vegetal, no pasa de 30 ºC. Aunque el edificio cuente con un techo aislado para retardar el caldeo del interior, las rejillas de entrada de aire del sistema de climatización suelen instalarse en el techo. Un aire de entrada más frío aminora la carga sobre el sistema.

➤ **ISLA DE CALOR:** Si se generalizan las azoteas verdes, se rebajará la carga de refrigeración de la ciudad, sobre todo por las noches, cuando las terrazas descubiertas irradian el calor que han absorbido durante el día. Según la Universidad Metropolitana de Tokio, en esa ciudad el incremento medio de temperatura desde 1900 quintuplica el del calentamiento global: una razón de peso para presionar a favor de tales construcciones.

➤ **MEJOR *SEDUM*:** Las plantas más recomendables para las azoteas verdes pertenecen al género *Sedum*. De porte breve, retienen agua abundante en las hojas; se cultivan para que soporten humedades y temperaturas extremas. Entre las especies habituales sobresalen *S. spathulifolium*, *S. album* y *S. spurium*.

➤ LAS AZOTEAS VERDES

suelen constar de cinco capas. Una placa de contención de las raíces impide que éstas penetren en el edificio. Una estera protectora minimiza las perforaciones. La capa de avenamiento descarga las lluvias intensas en un drenaje perimetral, a la vez que retiene la humedad para los períodos secos. Un filtro laminar atrapa las partículas finas para que no atoren la capa de avenamiento. El suelo de crecimiento, de un material artificial, aporta los nutrientes para las plantas.

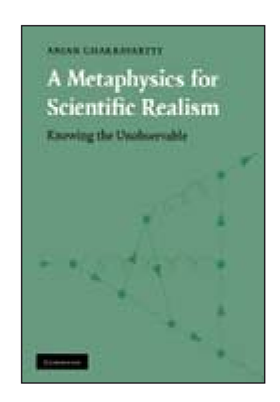


➤ LA CAPA DE AVENAMIENTO

retiene el agua que se difunde hacia arriba cuando se seca el suelo. La estructura alveolar facilita el desagüe del agua de tormenta y la aireación de las raíces.

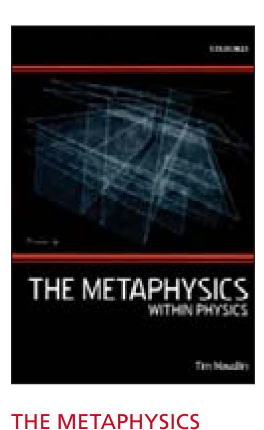
➤ EN LOS DISEÑOS INTENSIVOS,

que soportan plantas de gran porte, ciertas capas son más gruesas que en los diseños extensivos, destinados a plantas de porte breve.



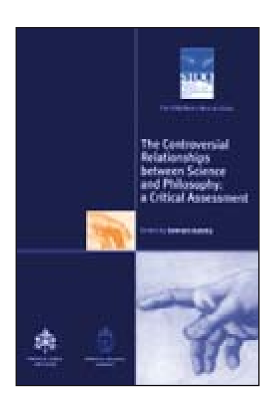
A METAPHYSICS FOR SCIENTIFIC REALISM. KNOWING THE UNOBSERVABLE,

por Anjan Chakravarty. Cambridge University Press; Cambridge, 2007.



THE METAPHYSICS WITHIN PHYSICS,

por Tim Maudlin. Oxford University Press; Oxford, 2007.



THE CONTROVERSIAL RELATIONSHIPS BETWEEN SCIENCE AND PHILOSOPHY: A CRITICAL ASSESSMENT.

Dirigido por Gennaro Auletta. Libreria Editrice Vaticana; Roma, 2006.

Realismo científico

De la física a la metafísica

La doctrina estándar sobre el saber que propusieron a principios del siglo XX los positivistas lógicos se cuarteó hace tiempo. Ha quedado demostrado que la ciencia no puede reducirse ni a un mero conocimiento empírico ni a un conocimiento analítico matemático, puramente formal. Debe admitirse un tercer componente, un conocimiento imaginativo, analógico e interpretativo, y entender por filosofía de la ciencia una inquisición sobre las condiciones de posibilidad de una ciencia de la naturaleza.

La física difiere del resto de las ciencias de la naturaleza por el papel central que otorga a la matemática. Cierto es que en ella las predicciones teóricas se contrastan con los resultados experimentales. Pero los físicos describen los fenómenos en que están interesados mediante modelos matemáticos y obtienen por razonamiento matemático sus predicciones. Aunque en el marco clásico, determinista, el término predicción encerraba un significado nítido. Lo cierto es que no somos matemáticos infinitamente inteligentes, ni experimentalistas capacitados para medir el estado de un sistema con suma precisión. Hasta tres revoluciones se han producido en la física reciente que afectan al significado del término predicción: la introducción de la mecánica estadística y del primer razonamiento probabilístico de Boltzmann y Gibbs en la segunda mitad del siglo XIX, el descubrimiento de la mecánica cuántica a comienzos del siglo XX y el estudio de los sistemas complejos desarrollado en los últimos años.

En el guión de la física contemporánea se identifican dos programas independientes: la unificación de las cuatro fuerzas fundamentales y la unificación de la física cuántica con la relatividad general. El paso dado por Weinberg-Salam en la unificación de la fuerza electromagnética con la fuerza nuclear débil creó la esperanza de sumar en el proyecto a la nuclear fuerte y la gravedad. Pese a los múltiples esfuerzos y algunos resultados parciales espectaculares, sigue vivo el propósito de crear una teoría cuántica de la gravedad. Y existe el hondo convencimiento de que ambos programas deberán converger en el nivel fundamental. La teoría que opera a ese nivel, que unificaría las cuatro fuerzas y combinaría la relatividad general con las teorías cuánticas de campos en una estructura matemática, recibe el nombre de "teoría del todo".

El nivel fundamental se denomina umbral o nivel de Planck. Se supone que al acercarnos a ese nivel nuestra física se destruye. Dos caminos conducen al umbral de Planck. Podríamos, reculando en el tiempo, seguir la contracción del universo con el crecimiento descomunal de su densidad media; cuando alcancemos la fantástica densidad media del orden de 10^{93} g/cm^3, nos hallaremos en el umbral de Planck. Pero podríamos también ahondar cada vez más en los estratos del mundo, explorar distancias cada vez menores y, cuando finalmente alcanzáramos escalas del orden de 10^{-33} cm, nos encontraríamos en el umbral de Planck. No existen dos umbrales de Planck distintos. Se trata del mismo umbral de Planck, no importa que lleguemos al mismo a través de un retroceso en el tiempo o de una profundización creciente en la estructura del mundo. Con otras palabras, el nivel fundamental no estaba sólo en el comienzo, sino que está siempre.

No faltan métodos y teorías o modelos en liza para obtener la unificación final de la física; recordemos, entre otros, la teoría de supercuerdas, con su generalización o teoría M. A su vez, una aproximación epidérmica nos muestra hasta qué punto difieren física de la gravedad y física de los cuanta. La gravedad opera a una escala enorme. Pese a ser la más débil de todas las fuerzas, conforma el macrocosmos. La física cuántica opera en el micromundo; todas las fuerzas fundamentales, salvo la gravedad, son de naturaleza cuántica y mucho más intensas que la gravedad.

La relatividad general, la teoría moderna del campo gravitatorio, no es más que una teoría geométrica del espacio-tiempo. El espacio-tiempo consiste en episodios puntiformes: algo que sucede *aquí* —en ese punto— y *ahora*, en este instante. Los sucesos no se hallan sólo bien localizados, sino que son sinónimos de localización. El espacio euclídeo es plano. Cuando un espacio se curva, nos hallamos en la geometría de Riemann. Recurrimos a la geometría pseudoeuclideana cuando el espacio-tiempo es plano, y la geometría pseudoriemanniana cuando el espacio-tiempo es curvo. En el primer caso tenemos la relatividad especial y en el segundo la relatividad general.

Los procesos cuánticos no se desarrollan en el espacio-tiempo. Su entorno matemático adecuado son los espacios de Hilbert. Estos espacios consisten en funciones; son espacios funcionales, que pueden organizarse también como vectores. Una dirección (o un vector) en un espacio de Hilbert representa un estado

de un objeto cuántico (un electrón, un quark, un átomo…). No tenemos acceso directo a un sistema cuántico, o a un objeto cuántico, sino sólo a sus estados. La naturaleza matemática de los espacios de Hilbert es radicalmente diferente de la naturaleza matemática del espacio en la relatividad general.

El nacimiento y el desarrollo de la física del siglo XX coincidieron con el programa antimetafísico de los positivistas lógicos, que hallaron sus expresiones más famosas en los fundamentos operacionistas de los principios básicos de la relatividad y de la teoría cuántica, a través del rechazo einsteiniano de la simultaneidad absoluta y la refutación de Heidegger de las trayectorias clásicas, como conceptos vacíos de cualquier significado físico. Por su parte, el instrumentalismo proponía que las teorías eran meros útiles para predecir fenómenos observables o sistematizar los datos registrados. En cambio, las entidades y procesos inobservables carecían de significado. En esto último convergía con el positivismo lógico. Pero allí donde el instrumentalismo tradicional sostiene que los enunciados sobre los términos inobservables carecen de sentido, el empirismo lógico asigna significado a algunos de estos enunciados mediante una interpretación no literal de los mismos, es decir, en tanto en cuanto se hallan asociados a términos observables. Sea, por ejemplo, el término “electrón”, que puede tomarse por abreviación de “traza blanca en una cámara de niebla”, dada la trayectoria de gotículas de agua que uno contempla en el experimento de la cámara de niebla, en el marco de la teoría que describe la trayectoria del electrón. Por medio de tales “reglas de correspondencia” o “principios puente” se reinterpreta la exposición del dominio de lo inobservable.

En ese contexto aparentemente hostil empezó a abrirse paso el realismo, la doctrina que sostiene que las teorías científicas ofrecen descripciones ciertas de objetos y procesos observables e inobservables del mundo, independiente de la mente. En su desarrollo, el realismo se abre en una dimensión triple: ontológica (existencia de un mundo o de una realidad independiente de la mente), semántica (los enunciados teóricos sobre esa realidad tienen valores de verdad y deben construirse literalmente, sean falsos o verdaderos) y epistemológica (los enunciados teoréticos nos dan un conocimiento del mundo). Se trata de teorías exitosas en su predicción —*maduras*, no *ad hoc*—, que literalmente describen la naturaleza de una realidad independiente de la mente y verdaderas.

Los enunciados científicos, afirma el realismo, remiten a datos reales del mundo y no se limitan a una función instrumental (*The Controversial Relationships between Science and Philosophy*). Observable es cuanto puede percibirse por cualquiera de los sentidos. Lo que se escapa de su capacidad entra en el dominio de lo inobservable, categoría que podemos subdividir en detectable y no detectable por medio de instrumentos que “extienden” el alcance de los sentidos. Las mitocondrias, por ejemplo, son orgánulos celulares de producción de energía que, pese a ser inobservables, podemos detectar con un microscopio potente. El neutrino, cuya existencia postuló Enrico Fermi en los años treinta, no se detectó hasta 1956. Ejemplos de cosas indetectables son las concepciones de Newton sobre posición y velocidad con respeto a un espacio absoluto y entidades causalmente ineficientes tales como los objetos matemáticos.

El realismo introduce elementos incluso más intangibles: leyes de la naturaleza, universales, causalidad y dirección del tiempo, cuyo estatuto y relación con la física se debate (*The Metaphysics within Physics*), con no menor pasión con que se critica su evolución contemporánea (*A Metaphysics for Scientific Realism*). Así, al abordar qué sea una ley de la naturaleza pesa en muchos todavía la teoría de la regularidad inscrita en la tradición empirista de David Hume; no habría leyes, sino regularidades en el universo físico. Todos los enunciados “normativos” de la forma (x) $(Fx \rightarrow Gx)$ reflejan sólo una *conjunción constante* de los fenómenos observables F y G. Las regularidades empíricas no constituyen una condición necesaria ni una condición suficiente.

Propone el realismo que, para explicar la estructura de la naturaleza, no deberíamos apoyarnos tanto en las regularidades cuanto en las relaciones de dependencia físicamente necesarias expresadas por el formalismo matemático de las ecuaciones. Esas ecuaciones parecen “saber más” que los propios científicos. Es la teoría de la necesidad, que se opone a la teoría de la regularidad.

Hilary Putnam apoyó la eficacia del realismo científico en el “argumento del milagro” con una expresión feliz: se trataba de la única filosofía que no hacía del éxito de la ciencia un milagro. Las teorías científicas permiten predecir, manipular y participar en los fenómenos del mundo, porque describen correctamente la naturaleza del mundo. Si así no fuera, el éxito obtenido por las ciencias habría que considerarlo milagroso. Dentro de las predicciones se subrayan las innovadoras, sobre clases de objetos o fenómenos que están por descubrir.

Pero el realismo se encuentra sometido hoy a una triple criba. En primer lugar, la inferencia abductiva, o inferencia a partir de la mejor explicación. De las hipótesis elaboradas, se escoge la que mejor explique los hechos observados. En segundo lugar, la subdeterminación de la elección de la teoría por datos o pruebas. Y, por fin, la inducción pesimista (PI), que se infiere de las discontinuidades en las teorías científicas en el curso del tiempo.

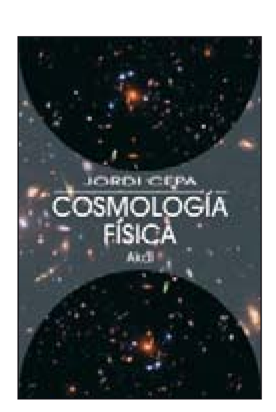
Se acostumbra ilustrar el concepto de inferencia a partir de la mejor explicación con el número de Avogadro. En los albores del siglo XX, cuando emergió el primer modelo atómico de la materia, se comprobó que varios procedimientos experimentales diferentes conducían a una misma determinación del número de Avogadro. Entre ellos, el movimiento browniano, la desintegración alfa, la difracción de rayos X, la radiación del cuerpo negro y la electroquímica; es decir, se llegaba al establecimiento del número de Avogadro a través del peso molecular dividido por la masa de una molécula, de átomos de helio requeridos para crear cierta masa de helio, de átomos exigidos para construir un cristal del número de moléculas por mol y de la carga del electrón. Ante esas cinco vías de medición distintas y convergentes, el realista debe optar por la más concorde con los datos recabados. Convergencia que no ocurriría si no hubiera átomos y moléculas que se comportan según lo predicho por la teoría.

La tesis de la subdeterminación se debe a Pierre Duhem; su reformulación posterior, a W. V. O. Quine. A tenor de la tesis Duhem-Quine, cualquier teoría puede esquivar su refutación mediante ajustes adecuados. Para ello, la hipótesis teórica principal se blinda con hipótesis auxiliares para producir predicciones. Si la observación y la experimentación arrojan datos que no son los predichos,

se aísla la hipótesis subsidiaria implicada, para dejar siempre a buen recaudo la hipótesis privilegiada. En efecto, dada una teoría, *T*1, cabe siempre generar una teoría empíricamente equivalente, *T*2, diferente de la anterior en otros aspectos. Por ejemplo, *T*2 podría excluir todas las entidades y procesos inobservables de *T*1, o sustituir unos con algunos otros, o simplemente alterarlos, aunque haciéndolo de suerte tal, que se produzcan exactamente las mismas predicciones observables. De ese modo, la subdeterminación parece minar la dimensión epistemológica del realismo científico, pues implica que las pruebas observacionales resultan insuficientes para aportar unas bases racionales para admitir la verdad, siquiera sea parcial o aproximada, de algunos enunciados científicos sobre entidades y procesos inobservables. Compete al realista encontrar una vía que le permita inferir una teoría particular a expensas de sus rivales. El realismo pone al descubierto el número insignificante de casos de subdeterminación en la historia de la ciencia. Y si se tomara el argumento de la subdeterminación estrictamente, habría que admitir que sólo podemos conocer lo que nosotros observamos directamente. Por ejemplo, no podríamos teorizar que los dinosaurios vivieron antaño, fundándonos en el registro fósil, porque otras teorías (las que defienden que se trata de trucos inteligentes) pueden dar cuenta de los mismos datos. Los realistas sostienen que, además de la adecuación empírica, existen otros criterios para la elección de teorías, como la parsimonia.

La inducción pesimista se apoya en la enseñanza de la historia de las teorías científicas, que nos muestra una sucesión de fracasos y aberraciones. Muchas de las mejores teorías del pasado son consideradas ahora graves errores. Hemos dejado de creer en las esferas cristalinas que jerarquizaban los cielos de la astronomía antigua y medieval, que la combustión sea un proceso en el que los materiales exuden "flogisto" o que el calor sea un fluido conservado llamado calórico. Si tal ha ocurrido con el pasado, puede suceder lo mismo con nuestras teorías actuales. No habría la estabilidad propuesta por el realismo. A ello el realista replica que tales sucesiones de las teorías constituyen, en definitiva, aproximaciones crecientes hacia la verdad.

Luis Alonso



COSMOLOGIA FISICA,
por Jordi Cepa.
Ediciones Akal; Madrid, 2007.

Física del universo

Un texto universitario ambicioso y completo sobre cosmología

La publicación de un libro de texto universitario en castellano es siempre un acontecimiento a celebrar. Tanto más en el presente caso, cuando el texto muestra un rigor al que siempre acompaña una gran claridad expositiva con ejemplos, figuras de apoyo, resúmenes y cuadros sinópticos que, por un lado, facilitan la comprensión de conceptos de suyo complejos y que, por otro, lo hacen especialmente adecuado tanto para la docencia como para su uso como texto de referencia.

En cuanto a contenidos el libro destaca por su completitud, puesto que cubre desde los conceptos básicos de relatividad general hasta la formación de las primeras estructuras no lineales en el universo. Todo ello tanto desde un punto de vista teórico como de las últimas observaciones disponibles. Dedica especial esfuerzo a aclarar, mediante ejemplos y figuras ingeniosamente concebidos, aspectos de la cosmología que se prestan habitualmente a confusión bajo un punto de vista conceptual, como es la expansión del universo, los horizontes cosmológicos o la corrección K. Tal y como el autor expresa en la introducción, uno de los propósitos del libro es cubrir, con rigor pero a un mismo nivel de dificultad y claridad, y siempre primando la pedagogía, los temas que abarca la cosmología, sin caer en tratamientos más complejos y oscuros de los temas en los que cada autor es especialista. A mi juicio ha salido airoso de la prueba; el fruto es un texto completo, cuidado, riguroso y pedagógico.

Por añadidura, el texto está completamente actualizado en cuanto a los últimos paradigmas de la cosmología: la masa del neutrino, el modelo concordante, la ecuación de estado de la energía oscura, la inflación y las anisotropías del fondo cósmico de microondas, entre otros.

También destacan digresiones históricas como la determinación de la constante de Hubble o de la historia de la cosmología en general, así como la discusión de una selección de modelos cosmológicos alternativos, o la crítica a la determinación de algunos parámetros cosmológicos. Todo ello enriquece el texto haciéndolo más entretenido y proporcionando al lector una visión más completa de la cosmología y de sus problemas pendientes.

En lo que se refiere a la vertiente docente, tal como se indica en uno de los apéndices, la obra permite impartir tanto cursos semestrales o anuales de cosmología para graduados o posgraduados, como un curso de iniciación a la astrofísica, o constituir parte de un curso de física extragaláctica, para todo lo cual en el apéndice se dan indicaciones sobre la estructura y contenidos recomendados en cada caso, basados en los temas del libro. Para cada capítulo se proporciona un resumen final en forma de texto y tablas sinópticas, que incluyen las ecuaciones más significativas y útiles, así como una gran variedad de ejercicios. Cabe destacar que la página web del libro (http://webpages.ull.es/users/jcepano) proporciona un índice temático detallado, contenidos y ejercicios adicionales, de utilidad para el estudiante así como para el profesor.

Finalmente, la edición es muy cuidada en cuanto a presentación, impresión y calidad del soporte. Si algo se echa en falta es un índice analítico. Esperamos que se incorpore en futuras ediciones.

Francisco Sánchez Martínez
Director del Instituto de Astrofísica de Canarias

Responsabilidad ante el cambio climático,

por John Broome

Contraponer nuestra prosperidad económica a la posibilidad de que el cambio climático disminuya el bienestar de nuestros nietos exige la toma de decisiones altruistas.

El tiempo y el origen del universo,

por Sean M. Carroll

El tiempo transcurre desde el pasado hacia el futuro. A escala cosmológica, en cambio, parece que la flecha del tiempo opera también en sentido inverso.



Fármacos contra el cáncer de mama,

por Francisco J. Esteva y Gabriel N. Hortobagyi

Las nuevas terapias dirigidas facilitan el desarrollo de tratamientos cada vez más eficaces, diseñados a medida para cada paciente.

¿Es sincero el canto de las aves?

por William A. Searcy y Stephen Nowicki

El estudio del canto de las aves arroja luz sobre la fiabilidad de la comunicación animal.

Dunas costeras,

por M.ª Luisa Martínez

Estos ambientes arenosos albergan una rica biodiversidad vegetal y animal. Purifican el agua y protegen contra el impacto de tormentas, huracanes y tsunamis.

